



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
NÚCLEO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
DESENVOLVIMENTO E MEIO AMBIENTE



**PROSPECÇÃO DA CRISE HÍDRICA POR MEIO DA
MODELAGEM HIDROLÓGICA NO RIO SÃO FRANCISCO**

Carlos Alberto Prata de Almeida

**São Cristóvão
2018**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
NÚCLEO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
DESENVOLVIMENTO E MEIO AMBIENTE



Tese de Doutorado

Carlos Alberto Prata de Almeida

PROSPECÇÃO DA CRISE HÍDRICA POR MEIO DA MODELAGEM HIDROLÓGICA NO RIO SÃO FRANCISCO

Tese submetida ao Núcleo de Pós-graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente da Universidade Federal de Sergipe, como pré-requisito para obtenção do grau de **Doutor em Desenvolvimento e Meio Ambiente**.

Orientador: Prof. Dr. Antenor de Oliveira Aguiar Netto.

**São Cristóvão
2018**

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE**

A447p Almeida, Carlos Alberto Prata de
Prospecção da crise hídrica por meio da modelagem
hidrológica no rio São Francisco / Carlos Alberto Prata de Almeida
; orientador Antenor de Oliveira Aguiar Netto. – São Cristóvão,
2018.
235 f. : il.

Tese (doutorado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) -
Universidade Federal de Sergipe, 2018.

1. Meio ambiente. 2. Desenvolvimento de Recursos hídricos -
Gestão ambiental. 3. Estatística não paramétrica. I. São
Francisco, Rio. II. Aguiar Netto, Antenor de Oliveira, orient. III.
Título.

CDU: 502:556.18(282.281.5)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
NÚCLEO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
DESENVOLVIMENTO E MEIO AMBIENTE



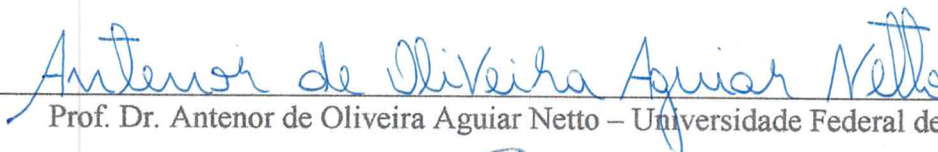
Carlos Alberto Prata de Almeida

PROSPECÇÃO DA CRISE HÍDRICA POR MEIO DA MODELAGEM
HIDROLÓGICA NO RIO SÃO FRANCISCO


Tese submetida ao Núcleo de Pós-graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente da Universidade Federal de Sergipe, como pré-requisito para obtenção do grau de **Doutor em Desenvolvimento e Meio Ambiente**.

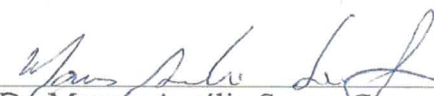
Aprovado em 03 de setembro de 2018.

BANCA EXAMINADORA


Prof. Dr. Antenor de Oliveira Aguiar Netto – Universidade Federal de Sergipe


Prof. Dr. Gregório Garrido Faccioli – Universidade Federal de Sergipe


Prof. Dr. Antônio Vital Menezes de Souza - Universidade Federal de Sergipe


Pesq. Dr. Marcus Aurélio Soares Cruz – Embrapa Tabuleiros Costeiros


Prof. Dr. Masato Kobiyama – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Este exemplar corresponde à versão final da Tese de Doutorado em Desenvolvimento e Meio Ambiente.



Prof. Dr. ANTENOR DE OLIVEIRA AGUIAR NETTO

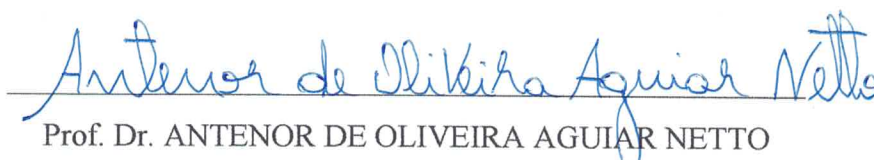
Orientador – Universidade Federal de Sergipe

É concedida ao Núcleo responsável pelo Doutorado em Desenvolvimento e Meio Ambiente da Universidade Federal de Sergipe permissão para disponibilizar, reproduzir cópias desta Tese, distribuir, emprestar ou vender tais cópias.



CARLOS ALBERTO PRATA DE ALMEIDA

Doutor em Desenvolvimento e Meio Ambiente – Universidade Federal de Sergipe
Autor



Prof. Dr. ANTENOR DE OLIVEIRA AGUIAR NETTO

Universidade Federal de Sergipe

Orientador

Dedico este trabalho à minha amada
esposa Lígia Filgueiras, à minha querida
mãe Maria Luzia e aos meus filhos:
Beatriz, Henrique, Eduardo e Daniel,
todos inestimáveis.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, acima de tudo e sempre, pelo simples fato da existência.

Ao Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, pelo reconhecimento da importância e permissão para a realização do curso de Doutorado em Desenvolvimento e Meio Ambiente.

Agradeço à Universidade Federal de Sergipe, em especial ao seu núcleo de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente (PRODEMA), por propiciar todo o suporte para a realização dos estudos e ampliação de conhecimentos.

Ao Prof. Dr. Antenor de Oliveira Aguiar Netto, pela confiança, dedicação e intervenções em todos os momentos decisivos.

À Profa. Dra. Maria José Soares Nascimento, pelo exemplo de dedicação e ao Prof. Dr. Antonio Carlos dos Santos, pela eficiência em ensinar o caminho do aprendizado.

À Rick e Biba, pelas ajudas nas incansáveis revisões e conversas sempre estimulantes e acaloradas.

Aos professores do PRODEMA, Dr. Antônio Vital, Dr. Inajá, Dr. Cristiano, Dr. Emílio, Dr. Tadeu, Dr. Adauto, Dra. Maria José, Dr. Marcelo, Dra. Laura Jane, Dra. Gicélia, pelas contribuições valiosíssimas na formação e consolidação de conhecimentos. Muito obrigado.

Aos amigos Francisco Livino e Paulo Amilcar, por sempre acreditarem e apoiarem minhas idéias e projetos. Vocês são motivo de orgulho pela simplicidade e alegria.

Ao Dr. Crystiano Ayres, pela dedicação e sensibilidade nos momentos difíceis.

Ao Prof. Dr. Gregório Guirado Faccioli, pela boa amizade que construímos.

Ao meu amigo Erhard, que torna fácil a solução de qualquer problema, sempre mostrando caminhos de muita sabedoria e virtude. Te admiro pela grande serenidade.

Ao Sr. José Ubraí e a D. Eulina, por estarem sempre presentes e dispostos a ajudar.

Ao meus irmãos e irmãs, pela compreensão diante das ausências.

Aos autores que não consegui citar, muito obrigado, a intensidade da leitura é sempre tamanha, não consegui registrar todos os seus nomes e citações mas lhes devo muito.

Agradeço a todos, conhecidos e desconhecidos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho. Deus os abençoe e lhes garanta grandes vitórias.

RESUMO

A bacia hidrográfica do rio São Francisco está ameaçada pela situação de crescente escassez e pela má utilização dos recursos hídricos, que põem em risco o desenvolvimento sustentável e a proteção do meio ambiente na região. Problemas relacionados à má gestão de água vêm se alastrando pelo planeta, não sendo um problema exclusivo do Brasil onde, desde a instituição da Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997), a temática é abordada a partir de fundamentos como a busca da garantia dos usos múltiplos; da bacia hidrográfica como unidade territorial para planejamento e atuação; do reconhecimento de que a água é um bem de domínio público (dotado de valor econômico); sendo um recurso natural limitado e assim devendo ter sua gestão descentralizada e contando com o apoio do Poder Público, dos usuários e das comunidades. Para que haja o bom planejamento, gerenciamento e uso dos recursos hídricos tornam-se necessárias a rápida compreensão e tomada de decisão, principalmente pela escassez e pela má distribuição do sistema de monitoramento no território nacional. A bacia hidrográfica do rio São Francisco, de elevadíssima importância nacional, vem apresentando um quadro preocupante de crise hídrica, o qual tem início, oficialmente, a partir do ano de 2013, quando se autorizou a histórica redução da defluência mínima de $1.300 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ para $1.100 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ e que tem se agravado, sendo que atualmente suas vazões têm sido mantidas na ordem dos $550\text{-}523 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, sem expressivas variações. Assim, propõe-se o uso da modelagem hidrológica, com ênfase no esclarecimento do fenômeno da crise hídrica, na qual a produção de água da bacia hidrográfica do rio São Francisco é estudada a partir de dois modelos, o TANK MODEL e o SWAT (*Soil and Water Assessment Tools*). Conclui-se que as vazões do rio apresentam-se com tendência negativa, com coeficientes de 1ª ordem para o período entre os anos de 2004 a 2016 oscilando entre (-104,01) a (-146,32). O modelo TANK MODEL, foi calibrado (NSE 0.72) e validado (NSE 0.68), gerando vazões de longo termo estacionárias, o que serviu de suporte para o esclarecimento de que apesar de real, as reduções das precipitações não são justificativas suficientes para explicar a gravidade da diminuição da produção de água. Neste sentido, percebe-se a necessidade de ampliação das discussões acerca das variáveis ambientais, suas interações e de uma nova orientação quanto ao Planejamento e Gestão dos recursos hídricos na bacia.

Palavras-chave: TANK MODEL, Estatística não paramétrica, Planejamento e Gestão de recursos hídricos.

ABSTRACT

The São Francisco river basin is threatened by a situation of increasing scarcity and poor use of water resources, which put at risk the sustainable development and protection of the environment in the region. Problems related to poor water management have been spreading throughout the planet, not being an exclusive problem in Brazil, since the establishment of the National Water Resources Policy (Law n. 9.433, January 8, 1997), the theme is approached from foundations such as the search for multiple uses guarantee; the river basin as a territorial unit for planning and action; the recognition that water is a public domain asset (endowed with economic value); being a natural resource limited and therefore should have its management decentralized and counting with the support of the Public Power, users and communities. For good planning, management and use of water resources, a rapid understanding and decision-making is necessary, especially due to the scarcity and poor distribution of the monitoring system in the country. The water catchment area of the São Francisco river, which has national importance, has presented a worrying picture of the water crisis, which officially began in 2013, when the historic reduction of the minimum deflection of 1,300 m³.s⁻¹ to 1,100 m³.s⁻¹ that has been aggravated. Its flows have been maintained in the order of 550-523 m³.s⁻¹, without significant variations. Thus, it is proposed the use of hydrological modeling, with emphasis on the clarification of the phenomenon of the water crisis, where water production of the São Francisco river basin is studied from two models, TANK MODEL and SWAT (*Soil and Water Assessment Tools*). It concluded that the river flows have a strong negative trend, with 1st order coefficients for the period between 2004 and 2016 ranging from (-104.01) to (-146.32). The TANK MODEL model was calibrated (NSE 0.72) and validated (NSE 0.68), generating stationary long-term flows, which served as a support for the clarification that: although real, precipitation reductions are not sufficient justification to explain the severity of the decline in water production. In this sense, it is necessary to expand the discussions about the environmental variables, their interactions and a new orientation regarding the Planning and Management of the water resources in the basin.

Keywords: TANK MODEL; non-parametric statistics; water resources planning and management.

SUMÁRIO

Resumo	viii
Abstract	ix
Sumário	x
Abreviaturas e Siglas	xiii
Lista de Figuras	xiv
Lista de Tabelas	xix

CAPÍTULO 1 - OBJETIVOS E JUSTIFICATIVA

1.1. Introdução	20
Hipótese	22
Objetivo Principal e Objetivos Específicos	22
Apresentação geral da tese	22

CAPÍTULO 2 - REVISÃO DE LITERATURA

2.1. O Ambientalismo e a Centralidade das Águas	25
2.2. Modelagem Hidrológica	45
2.3. Modelos hidrológicos TANK MODEL e SWAT	48
2.3.1. O Modelo TANK MODEL	52
2.3.2. O Modelo SWAT	59
2.4. Modelagem hidrológica na bacia hidrográfica do rio São Francisco	60
2.5. Crise Hídrica	69
2.6. Referências	73

CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA

3.1. Bacia hidrográfica do rio São Francisco	86
3.1.1. Relevo e Geologia Condições de Saneamento Básico	88
3.1.2. Solos e Irrigação	100
3.1.3. Hidrografia	101
3.1.4. Fitogeografia e Fauna	105

3.1.5. Condições de Saneamento Básico	109
3.2. Seleção dos modelos utilizados na pesquisa	110
3.3. Modelagem SWAT	112
3.4. Modelagem TANK	118
3.5. Calibração e Validação dos Modelos	121
3.6. Técnicas de AED e uso de Estimadores Estatísticos	122
3.7. Referências	127
CAPÍTULO 4 - MODELAGEM DIGITAL DOS SOLOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO	
4.1. Introdução	136
4.2. Revisão De Literatura	137
4.3. Metodologia	146
4.3.1. O Rio São Francisco	146
4.3.2. Modelagem Digital do Solo	148
4.3.3. Fontes de dados	149
4.3.4. Hardware/Softwares utilizados	150
4.4. Resultados e Discussão	150
4.5. Considerações Finais	157
4.5. Referências	158
CAPÍTULO 5 - PARADIGMA BIG DATA NA MODELAGEM HIDROSEDIMENTOLÓGICA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO	
5.1. Introdução	165
5.2. Metodologia	167
5.2.1. O Rio da Integração Nacional	167
5.2.2. Criação da estrutura de dados do SWAT	168
5.2.3. Dados preliminares da Bacia Hidrográfica do rio São Francisco	168
5.2.4. Gravação da estrutura de dados/Calibração do SWAT	170
5.2.5. Hardware/Softwares utilizados	170

5.3. Resultados e Discussão	171
5.4. Considerações Finais	177
5.5. Referências	177
CAPÍTULO 6 - MODELAGEM CHUVA-VAZÃO DO RIO SÃO FRANCISCO, COM ÊNFASE NAS BARRAGENS, POR MEIO DO TANK MODEL	
6.1. Introdução	182
6.2. Revisão de Literatura	183
6.3. Metodologia	186
6.3.1. O rio São Francisco	186
6.3.2. Dados necessários aos modelos/Fontes de Dados	189
6.3.3. Pré-processamentos/Seleção dos Dados Ambientais	192
6.3.4. Implementação de um modelo Tank Model: o TKM	195
6.3.5. Avaliações dos dados primários e das simulações	198
6.4. Resultados e Discussão	198
6.5. Conclusões	229
6.5.1. Conclusões sobre a diminuição das chuvas e gestão dos recursos hídricos	229
6.5.2. Conclusões relativas à modelagem chuva-vazão com Tank Model	229
6.6. Recomendações ao futuros pesquisadores	230
6.6. Referências	231

ABREVIATURAS E SIGLAS

ABAS	Associação Brasileiras de Águas Subterrâneas
ANA	Agência Nacional das Águas
APA	Área de Preservação Ambiental
APP	Área de Preservação Permanente
ARS	Agricultural Research Service
BDSOLOS	Banco de Dados de Solos Brasileiros
CBHSF	Comitê da Bacia Hidrográfica do rio São Francisco
CERB	Companhia de Engenharia Ambiental e Recursos Hídricos da Bahia
CFSR	Climate Forecast System Reanalysis
CHESF	Companhia Hidrelétrica do São Francisco
CIAT	Centro de Integração para Agricultura Tropical
CODEVASF	Companhia de Desenvolvimento do Vale do São Francisco
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
CPTEC	Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos
CREAMS	Chemical, Runoff and Erosion from Agricultural Management
DDT	Diclorodifeniltricloroetano
DEM	Modelo de Elevação Digital
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
DQA	Diretiva (Quadro da Água)
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPIC	Erosion Productivity Impact Calculator
ETP	Evapotranspiração Potencial
ETR	Evapotranspiração Real
EUPS-M	Equação Universal da Perda do Solo Modificada
FAO	Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura

GLEAMS	Ground Water Loading Effects on Agricultural Management Systems
HAWAQS	Hydrologic and Water Quality System
HRU	Hydrologic Response Unit
HRUS	Unidade de Resposta Hidrológica
HWSD	Harmonized World Soil Database
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IBDF	Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IIASA	Instituto Internacional de Análise de Sistemas Aplicados
IUS	Índice de Umidade dos Solos
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
ISRIC	Centro Internacional de Informação de Referência do Solo
MDT	Modelo Digital do Terreno
MI	Ministério da Integração
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MME	Ministério das Minas e Energia
MPS	Material Particulado em Suspensão
MT	Ministério dos Transportes
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NSE	Eficiência Nash-Sutcliffe
OGC	Open Geospatial Consortium
OMC	Organização Mundial do Comércio
ONG	Organização não-governamental
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
ONU	Organização das Nações Unidas
PBIAS	Tendência Percentual do enviesamento

PHE	Plano Hidroviário Estratégico
PLANVASF	Plano Diretor para o Desenvolvimento do Vale do São Francisco
PND	Plano Nacional de Desenvolvimento
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
PNUD	Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
REML	Máxima Verossimilhança Restrita
RK	Kriggagem por Regressão múltipla
RL	Reserva Legal
ROTO	Routing Outputs to Outlet
RPPN	Reserva Particular do Patrimônio Natural
RRL	Rain Runoff Library
RSR	Normatização da Raiz do Erro Médio Quadrático pelo Desvio Padrão
SAGA	System for Automated Geoscientific Analyses
SAR	Sistema de Acompanhamento de Reservatórios
SCS	Soil Conservation Service
SEB	Setor Elétrico Brasileiro
SEMA	Secretaria do Meio Ambiente
SIAGAS	Sistema de Informações de Águas Subterrâneas
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SIN	Sistema Interligado Nacional
SINGREH	Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos
SISNAMA	Sistema Nacional de Meio Ambiente
SISSOLOS	Sistema de Informação de Solos
SMAP	Soil Moisture Accounting Procedure
SNUC	Sistema Nacional de Unidades de Conservação

SOTERLAC	Soil and Terrain Database for Latin America and the Caribbean
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
SSARR	Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation
SUDEPE	Superintendência da Pesca
SUDHEVEA	Superintendência da Borracha
SWAT	Soil and Water Assessment Tool
SWRRB	Simulator of Water Resources of Rural Basins
TAMU	Texas A&M University
TI	Tecnologia da Informação
TMI	Tank Moisture Index
UC	Unidade de Conservação
UHE	Unidade Hidrelétrica
UNESCO	Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura
US EPA	Environmental Protection Agency of United States
USACE	Corpo de Engenharia do Exército dos Estados Unidos da América
USBR	United States Bureau of Reclamation
USDA	United States Department of Agriculture
USGS	Departamento de Geologia dos Estados Unidos da América
WEPP	Water Erosion Prediction Project
WRB	World Reference Database
ZME	Zona Marítima Estuariana

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Modelo Tank Model.	54
Figura 2.2. Dinâmicas da água no Modelo Tank Model.	55
Figura 2.3. Modelo tanque linear simples	56
Figura 2.4. Determinação do tempo de secagem de um tanque linear simples	57
Figura 3.1. Localização da bacia hidrográfica do rio São Francisco.	87
Figura 3.2. Distribuições das Declividades e Hipsometria da bacia do São Francisco.	88
Figura 3.3. Distribuições Unidades Fisiográficas da bacia do São Francisco.	90
Figura 3.4. Distribuição Geologia Aflorante da bacia do São Francisco.	91
Figura 3.5. Distribuição dos Períodos Geológicos e Tipos de Embasamento da bacia do São Francisco.	93
Figura 3.6. Distribuição dos Recursos Minerários da bacia do São Francisco cadastrados no DNPM.	94
Figura 3.7. Carta Hidrogeológica da bacia do São Francisco.	95
Figura 3.8. Carta Domínios Hidrogeológicos da bacia do São Francisco.	97
Figura 3.9. Carta Biomas e seus remanescentes na bacia do São Francisco.	106
Figura 3.10. Carta Avanço da ocupação das terras na bacia do São Francisco, anos 2000, 2010 a 2012.	107
Figura 3.11. Equações do Modelo Tank Model.	120
Figura 4.1. Localização da bacia hidrográfica do rio São Francisco.	147
Figura 4.2. Mapeamentos resultantes das diferentes metodologias de zoneamento dos solos.	152
Figura 4.3. Exemplos de algumas das camadas preditoras avaliadas no presente estudo, da esquerda para direita tem-se: Profundidade dos solos, Distribuição anual das chuvas, Teor de areia na primeira camada do solo (0-5cm), TWI SAGA, Distribuição dos Ventos e NDVI.	153
Figura 4.4. Boxplot da distribuição do KsT para os diferentes tipos de solos.	154
Figura 4.5. Distribuição Espacial dos Ks modelados e composição RGB com as camadas texturais (Argila, Silte e Areia)	155
Figura 4.6. Ajuste gráfico dos valores Ks modelados e KsT_FeBR.	156
Figura 5.1. Análise da qualidade das drenagens geradas a partir de MDTs de 30m de 90m.	172
Figura 5.2. Economia do Brasil no Século XVIII; carta de época Zone Economique (1952) e Expansão da Agricultura nas últimas décadas.	173
Figura 5.3. Cartas de solos SOTERLAC, HWSC e SIBCS(EMBRAPA, 2006)	173

Figura 5.4. Seleção das Estações de Chuva	174
Figura 5.5. Validação da Produção de água entre os anos de 1980 a 2010.	174
Figura 5.6. Produtividade média anual de sedimentos nas sub-bacias do rio São Francisco, no período de 1980 a 2010.	176
Figura 5.7. Distribuição temporal da Produção de sedimentos do rio São Francisco	177
Figura 6.1. Localização da bacia hidrográfica do rio São Francisco	187
Figura 6.2. Ferramenta para calibração manual do modelo Tank Model	193
Figura 6.3. Tank Model de Porto de Andorinhas/MG com apresentação do resultado de calibração em planilha de cálculo.	194
Figura 6.4. Disponibilidade dos dados de precipitação na bacia do São Francisco entre 1910 a 2016.	200
Figura 6.5. Estações com falhas nos dados de chuva no mês de janeiro.	201
Figura 6.6. Distribuição cronológica do número de estações pluviométricas.	201
Figura 6.7. Acumulado da precipitação nos meses de janeiro a junho, pela técnica de Thiessen, para a bacia hidrográfica do rio São Francisco.	204
Figura 6.8. Acumulado da precipitação nos meses de julho a dezembro, pela técnica de Thiessen, para a bacia hidrográfica do rio São Francisco.	205
Figura 6.9. Chuvas Thiessen para a bacia hidrográfica do rio São Francisco. Períodos: 1941 a 1962 (pré-barragens) e 1998 a 2016 (recente).	206
Figura 6.10. Boxplot dos acumulados mensais de chuvas no período de 1941 a 2016	208
Figura 6.11. Boxplot dos acumulados anuais de chuvas no período de 1945 a 2016	210
Figura 6.12. Gráfico RAPS para o período de 1941 a 2016	213
Figura 6.13. Gráficos das relações chuva-vazão em dois períodos distintos de crise hídrica	217
Figura 6.14. Boxplot dos acumulados anuais de vazões no período de 1945 a 2016	218
Figura 6.15. Turbinamento de Sobradinho diante da situação de crise.	219
Figura 6.16. Manutenção do enchimento do reservatório Luiz Gonzaga no período de 1998 a 2007.	220
Figura 6.17. Falha na manutenção do enchimento do reservatório Luiz Gonzaga no período de 2013 a 2016.	222
Figura 6.18. Gráfico das vazões médias anuais do rio São Francisco ordenadas.	223
Figura 6.19. Gráfico das regressões ordinárias de vazões médias anuais do rio São Francisco	224
Figura 6.20. Comparações das vazões registradas pelas estações fluviométricas localizadas em Manga/MG e Barra/BA na bacia do São Francisco.	226
Figura 6.21. Poços de captação subterrânea cadastrados no SIAGAS	227

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Principais Atividades de Irrigação na bacia do São Francisco	100
Tabela 3.2. Principais Reservatórios da Bacia do São Francisco	103
Tabela 4.1. Coeficientes das Componentes Principais calculados pelo software ILWIS	153
Tabela 6.1. Formação dos 19 grupos de vazões médias anuais	197
Tabela 6.2. Grupos utilizados na comparação de períodos de chuvas	198
Tabela 6.3. Resultados das estatísticas de homogeneidade e tendência	207
Tabela 6.4. Resultados das estatísticas de aleatoriedade da variável de decisão	212
Tabela 6.5. Ajuste dos parâmetros do Tank Model para a bacia do rio São Francisco	216

CAPÍTULO 1 - Objetivos e Justificativa

A escassez e a má utilização dos recursos hídricos ameaçam o desenvolvimento sustentável e a proteção do meio ambiente, sendo questões recorrentes levantadas por tomadores de decisão em muitos países. No Brasil, desde a instituição da Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997), aborda-se a temática a partir de fundamentos como a definição do uso prioritário, a busca da garantia dos usos múltiplos, da aceitação da bacia hidrográfica como unidade territorial para planejamento e atuação, do reconhecimento de que a água doce é um bem de domínio público e dotado de valor econômico, sendo primordial, portanto, uma gestão descentralizada, contando com a participação dos usuários e das comunidades e com o apoio do Poder Público.

Dessa forma, para um eficiente planejamento, gerenciamento e uso dos recursos hídricos é interessante dispor de procedimentos que permitam rápida compreensão dos fenômenos que ocorrem no corpo d'água e de suas interfaces com o ambiente e sociedade circundantes. Por outro lado, visando-se fortalecer a participação nas tomadas de decisão, é necessário considerar a existência de estudos prévios e de dados.

Estes elementos consubstanciam-se no rio São Francisco, que vem sofrendo grandes dificuldades para atender crescentes demandas por água, havendo riscos até para o abastecimento humano. Isto se identifica na retomada das discussões acerca da importância de registro das variáveis ambientais, mas principalmente a partir das publicações científicas acompanhando a elaboração dos planos decenais da bacia, a respeitabilidade do macro-zoneamento ecológico-econômico, a implementação do programa de revitalização e de projetos de transposição de suas águas.

Diversos estudos têm apontado os sinais e os sintomas de um rio sob estresse hídrico, diagnosticando os excessos da exploração e do desrespeito à vida. É neste íterim que os horizontes vão se estreitando para a região do baixo São Francisco, onde vários autores já apontam perdas. Vasco *et al.* (2017) destacam que a regularização de um rio por barramento provoca impactos na quantidade e qualidade da água, assim como na sazonalidade dos eventos de vazões. Santana *et al.* (2018) identificaram que a diminuição da vazão tem aumentado a salinização das águas na foz do rio São Francisco provocando impactos para o abastecimento público, agricultura e pesca. Araújo *et al.* (2018) reportam os prejuízos sociais e econômicos

acarretados pela erosão oceânica na região da foz, mas que se estenderá para mais áreas da costa marítima do Estado de Sergipe.

Além disso, o rio São Francisco já não consegue atender às múltiplas demandas, a exemplo da navegação, e está vivenciando um período de crise hídrica que tem sido atribuído à diminuição das chuvas. A crise atual apresenta a maior duração e intensidade desde o advento das grandes barragens. Reconhece-se como seu início a data 01/04/13, quando se autorizou a redução (pioneira) das defluências do seu sistema hidroelétrico de $1300 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ para $1.100 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. Outras autorizações se seguiram, tendo sido a última, a Resolução nº 51/2018 da ANA, publicada no Diário Oficial da União em 01/08/2018 prorrogando, até 30/11/2018, a manutenção da vazão média diária defluente para $550 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. (ANA, 2018).

Nesse contexto, diante da necessidade de representação de muitos eventos e interações que ocorrem nos sistemas hidrográficos, a modelagem matemática pode trazer respostas. A modelagem matemática é um campo que vem se desenvolvendo na Hidrologia, tendo dado origem a diversos modelos hidrológicos que têm sido cada vez mais utilizados pelas nações de todo o mundo. A modelagem matemática oferece meios para tratar o complexo comportamento das condições naturais e torna possível a predição dos resultados de processos físicos, a exemplo da vazão e transporte de sedimentos. Frente às constantes alterações no uso e ocupação do solo, ou mesmo de aplicações práticas que vão desde o cálculo das obras de arte de interesse econômico-social à pesquisa científica, a modelagem matemática favorece ao planejamento e gestão ambientalmente equilibrados.

A modelagem matemática é assim, uma ferramenta útil a se dispor na busca da compreensão desta crise hídrica do rio São Francisco que tem sido atribuída à diminuição das precipitações nas regiões fisiográficas do alto e do médio São Francisco, que são as principais áreas de aporte pluvial da bacia hidrográfica. Os órgãos oficiais afirmam que a redução das chuvas vem se apresentando de forma mais intensa e prolongada nos últimos tempos, a ponto de refletir negativamente sobre as vazões regularizadas do São Francisco (ANA, 2018).

Para uma percepção mais ampla das problemáticas da natureza, deve se pautar a necessidade de planejamento e gestão a partir de uma visão focada nos indivíduos. Araújo (2016) aponta que a relevância econômica do rio São Francisco para os municípios ribeirinhos, ultrapassa relações de mercado e suas agendas, evocando a importância sociocultural e o impacto das ações de “macro” gestão na vida daquelas populações. Assim, considera-se fundamental o

conhecimento da fração de água disponível para utilização no interior da bacia do São Francisco, haja vista que se trata de um recurso limitado e essencial para o desenvolvimento, necessitando-se de tratamento e ferramentas adequadas para traduzir o comportamento das variáveis que compõem o sistema hídrico. (VASCO et al., 2017).

Tal água tem valor, claro, mas que não há como se pagar mediante nenhum tipo de compensação, dado que envolve o respeito aos ecossistemas que a compartilham com o homem. A gestão dos recursos hídricos requer muito mais do que planejamento, atenção e dedicação, ela requer respeito à vida e responsabilidade.

Hipótese

Avaliar se a crise hídrica do rio São Francisco é devidamente explicada pela redução das chuvas que vêm ocorrendo nos últimos anos.

Objetivo Principal

O presente trabalho tem por objetivo avaliar a produção de água do rio São Francisco a partir do modelo chuva-vazão Tank Model, aplicado para período antes da construção das grandes barragens.

Objetivos Específicos

1. Parametrizar, calibrar e validar o modelo chuva-vazão Tank Model na produção de água do rio São Francisco no período que antecede a regularização de suas vazões;
2. Simular vazões realísticas a partir das séries históricas de precipitações representativas de sua bacia hidrográfica.
3. Analisar mudanças na atual gestão dos recursos hídricos do rio São Francisco em épocas de déficits de precipitação pluviométrica.
4. Analisar o uso do modelo SWAT (Soil and Water Assessments Tool), avaliando seu potencial de aplicação no planejamento e gestão da bacia hidrográfica do rio São Francisco.

Apresentação geral da tese

No Capítulo 1, em decurso, é feita uma introdução sobre a crise hídrica do rio São Francisco, destacando-se sua evolução, buscando dar exclusividade à ocorrência de redução das chuvas como sendo responsável pela problemática. Em seguida, expõem-se a hipótese e os objetivos, seguidos pela apresentação dos capítulos que constituem o presente texto de tese.

O Capítulo 2 é composto de uma revisão de literatura dos temas pertinentes ao estudo, no qual, dada a importância social e econômica do rio São Francisco, busca analisar a evolução histórica do que se entende por “ambientalismo”. Para tanto, adotou-se a dialética entre marcos normativos e paradigmas filosóficos, exaltando a pertinência de ser considerada a “centralidade das águas” como fator aglutinante e necessário dos recursos naturais, visando a materialização das aspirações por um “desenvolvimento sustentável”. Posteriormente, aponta-se sucintamente as epistemologias do termo “crise”. Em seguida, concentra-se no âmbito do planejamento e gestão, onde busca apresentar a evolução e possibilidades da modelagem matemática de sistemas naturais, a exemplo do ciclo hidrológico.

O Capítulo 3 discute as metodologias utilizadas, realizando uma caracterização do espaço geográfico da bacia hidrográfica do rio São Francisco e em seguida é feita uma discussão sobre as premissas iniciais da pesquisa que induziram a seleção dos modelos Tank Model e SWAT. Posteriormente são apresentadas as metodologias para a preparação dos modelos hidrológicos Tank Model e SWAT, a fim de realizar suas calibrações e validações. Por fim, são apresentadas as estatísticas utilizadas para avaliação das simulações e ainda daquelas utilizadas para a realização da Análise Exploratória de Dados (AED), aplicadas sobre variáveis chuva e vazão.

Quanto aos capítulos 4 e 5, estão relacionados à modelagem com a ferramenta SWAT. No capítulo 4 será apresentado o estado da arte da obtenção dos dados de solos, já que estes são o alicerce para obtenção de modelos hidrológicos espacialmente distribuídos, como o SWAT. Para além das diversas fontes e de seus formatos (tabulares, vetoriais e *raster*), o capítulo descreve procedimentos de geoprocessamento e geoestatística necessários à interpolação dos atributos de solo pela técnica da Kriggagem por Regressão múltipla (RK). Como conclusão são apresentados produtos, para a camada do solo de 0 a 5 cm de profundidade, relacionados à distribuição textural (teores de silte, argila e areia) e condutividade hidráulica do solo saturado, abrangendo o recorte da parte das regiões Nordeste e Sudeste que contém a bacia hidrográfica do rio São Francisco.

No capítulo 5 apresenta-se uma modelagem SWAT da bacia hidrográfica do rio São Francisco, onde se atenta para as grandes dificuldades, especialmente no Brasil, na obtenção e tratamento de dados ambientais. Visando atender à modelagem hidrológica em larga escala, este paradigma poderá ser resolvido a partir da adoção de estratégias Big Data, para as quais a distribuição do modelo SWAT ainda não está preparada. Contudo, como a ferramenta “*stand all one*” do SWAT, ArcSWAT, é bastante robusta, apresenta alternativas que auxiliam na superação da grande rigidez da sua estrutura de dados, o que permite gerar produtos muito úteis já desde o

nível de reconhecimento da bacia, quando ainda não se dispõe de registros das variáveis de entrada, ou os mesmos sejam insuficientes como é o caso da bacia hidrográfica do rio São Francisco. Como resultado, é apresentada uma verificação do ajuste da produção de sedimentos da bacia através de consulta na mídia, onde fora identificado um evento extremo de chuvas (com inundações e grandes prejuízos). Além da região de abrangência, a análise permitiu também que se estimasse a grande magnitude e o momento da ocorrência.

Prosseguindo, no capítulo 6 são apresentados os estudos realizados para a identificação da redução das chuvas e da análise da crise hídrica do rio São Francisco, relacionando a redução das precipitações pluviais com a gestão das barragens. Para alcançar esse objetivo, foi utilizado o modelo chuva-vazão Tank Model, Análise Exploratória de Dados de dados chuvas Thiessen, de dados de médias das vazões naturais e dos dados sintéticos (TKM e SAR). A AED será fundamentada no uso de estimadores estatísticos não paramétricos, BoxPlots, no gráfico RAPS (*Rescaled Adjusted Partial Sums*), em gráficos de regressões lineares ordinárias e em gráficos lineares ou de barras.

No capítulo 7, são apresentadas recomendações para futuros pesquisadores e gestores de recursos hídricos na bacia hidrográfica do rio São Francisco e após, a conclusão geral da pesquisa.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO DE LITERATURA

2.1. O Ambientalismo e a Centralidade das Águas

A gestão de recursos hídricos ainda será aceita como a mais importante tarefa a ser executada para promoção da dignidade humana. A água permite o desenvolvimento do homem ao lhe garantir saciar a sede e produzir alimentos, necessários à sua sedentarização. Quando bem gerida, favorece a organização em sociedade a partir da dinamização dos meios e dos modos de vida humanos, garantindo-lhes ampliação na produção e reprodução do seu saber já que promove maior liberdade no uso do tempo.

A manutenção da disponibilidade dos recursos hídricos com as qualidades e quantidades necessárias, oferece à humanidade conforto, saúde e desafios fabulosos. Não é por acaso que a água é objeto de questões encontradas no que se conhece como história humana. Sua essencialidade é recorrente no estabelecimento do próprio Direito Natural dos povos. Percebe-se isto quando se observa que apesar da indiscutível diversidade cultural, todas as grandes civilizações da antiguidade foram gestadas nas extensas áreas pluvionares às margens de grandes rios, tais como Tigre e o Eufrates, o Nilo, o Amarelo e o Indo. Contudo, a brilhantíssima civilização grega merece um destaque e não somente pela exceção a tal regra. Os gregos construíram a maioria das suas cidades-estados nos terrenos mais secos e não nas várzeas. Talvez devido a sua pequena área territorial, juntamente às características geofísicas locais, que de tal modo lhe conferem pequeno número de rios, os quais por sua vez, são pouco extensos. O que, associado ao clima seco, implica em fortíssima restrição hídrica (KOUTSOYIANNIS, 2006).

Em relação, não somente aos gregos e outras grandes civilizações da antiguidade, mas a todas assentadas sob condições de estresse hídrico, poder-se-ia elencar um sem número de intervenções hídricas. Construção de aquedutos, túneis, barragens, desvios de rios, além do desenvolvimento de técnicas de saneamento, de captura de água e de irrigação que chegam a datar de mais de três mil anos antes de Cristo, havendo registro de poços escavados a mais de 9000 anos. Porém, tais intervenções têm em comum o fato de serem utilitaristas. A água, apesar de sempre ocupar um lugar relevante, até mesmo nas teogonias de tais povos, não possuía nenhum direito e o único respeito de que gozava era devido ao interesse no seu uso.

Conforme Burnet (1950), a visão de mundo irá sofrer uma profunda transformação somente a partir dos séculos VII a.C. a VI a.C., na mais rica cidade-estado grega, Mileto, que se localizava numa de suas mais bem sucedidas colônias continentais, às margens do Egeu, no

Oriente Médio. A grande novidade foi o despertar para a importância da substituição da interpretação do mundo pelo viés sobrenatural pelo conceito de um universo governado por leis da natureza. Um seleto grupo de pensadores (Thales, Anaxímenes e Anaximandro) estava bastante consciente da necessidade de verificação. Isto eles expressaram dizendo que toda hipótese deve fazer justiça a todos os fatos observados, fundando aí a Ciência Objetiva.

A ciência irá progredir de maneira radiante, principalmente no período da Grécia Helenística, mas será vítima de perseguição e quase extinta. Silva (2000) faz lembrar que as condições históricas são determinantes para a mudança de paradigma. As concepções míticas perduraram graças à identificação comunitária, através de uma complexa trama simbólica legitimadora da ordenação do poder. Essa função social homogeneizadora do mito, em parte, explicará sua sobrevivência que dependerá da satisfação das necessidades de produção e explicação das coisas.

Seguindo-se a marcha agora em rumo ao período clássico romano, quando o arquiteto Vitruvius (50a.C. - 15d.C) projetou e construiu grandes aquedutos para distribuição das águas na área urbana. Bem verdade que a tecnologia já era conhecida de outros povos de longa data e que havia sido introduzida em Roma pelo seu antecessor (Ápio), quando os chafarizes e a gratuidade da água eram símbolos do poder do Estado, mas o grande destaque de Vitruvius foi seu plano de gestão das águas inovador, dividindo o abastecimento em três compartimentos: um para atender as fontes de águas consuntivas, outro para os prédios públicos e um para as residências particulares as quais pagavam taxas. Posteriormente, conforme o regime romano vai entrando em declínio, a cobrança se estende também para as fontes. (CAMPOS, 2013). Ou seja, nestes períodos as taxas não eram aplicadas devido a um valor econômico dado à água, mas sim aos serviços de manutenção das estruturas necessária, tal como proteção e, mais tardiamente, também pela entrega (carregamento da fonte até outro local).

A centralidade da água é facilmente percebida para qualquer ponto que se olhe no passado humano e vai desde a sua essencialidade para dessedentação até o seu papel fundamental para o atendimento das questões sanitárias e como insumo para todos os fazeres práticos, como na produção agropecuária, na indústria, e não somente isto: é utilizada como modal de transporte (navegação), como marco referencial na divisão política, como local da prática de esportes e atividades recreativas e ainda por cima, é uma importante fonte de alimentos, através da pesca. A questão da relevância da água para o homem é indiscutível e por isso será deixada para mais adiante, neste tópico.

Já a questão de distinguir a presença de uma conscientização ambiental, não é algo assim tão trivial, visto que alguns elementos essenciais como a compreensão do que vem a ser o conceito meio ambiente e quais valores imanes são considerados pelas sociedades humanas em cada período do seu processo da formação. Apenas com essas ponderações depara-se já com razoável complexidade, não pela interpretação literal a qual trata da interpolação de três outros conceitos: o de natureza, o de sociedade e o de economia. Há uma recursividade nas relações (interações) entre seus conceitos componentes, demandando um estudo sincronizado de suas formações historicamente, sob a perspectiva de indícios que apontam para antecedentes que nem sempre dispõem de registros, a exemplo dos conceitos de sociedade e de economia que se associam à própria evolução humana enquanto ser consciente.

A visão de natureza do Mundo Antigo vincula-se inextricavelmente àquela do homem resignado à “hostilidade” do mundo natural estando à mercê de seus mistérios (inesgotabilidade e fenomenologia). Dizer que natureza é o conjunto de fatores bióticos e abióticos do meio onde se vive explica bem o conceito para um olhar contemplativo, mas não o traduz completamente, pois o homem tem nele suas atividades que em conjunto irão lhe dar um sentido de propriedade. Na maioria das sociedades primitivas, foi a partir da religião que se estabeleceu o direito de propriedade, quando o homem exerce domínio sobre a coisa e se reveste dos atributos de poder usar, dispor, defender e reivindicar a coisa.

Sendo assim, nas épocas mais remotas, todas as coisas pertenceriam a algum Deus - conforme a cultura do lugar - e não havia coisa pertencente a algum da população. Nesse processo de base religiosa e da profunda ligação com os ancestrais, que passaram a ser venerados em seus túmulos, surgiu uma lógica específica: um túmulo, uma família, uma propriedade. No Direito Romano antigo (“*ius civile*”- código civil), esta forma arcaica foi reconhecida como direito quiritário para todos aqueles em gozo do status (“*civitas*”- romano de nascimento) (PINTO, 2008). Ou seja, todas as coisas nos períodos mais primitivos são vistas como pertencentes ao deus que a criou, por extensão, em Roma (“*res nullius*”- coisas de ninguém), o que irá ser traduzido mais ou menos em algo do tipo: quem achar primeiro será dono.

O resultado disto foi o início da organização de um direito positivo (codificado), onde os romanos foram aperfeiçoando a distinção das coisas em: “*res divini iuris*”, coisas divinas e “*res humani iuris*”, coisas humanas. Das coisas pertencentes aos homens, umas eram públicas (“*res publicae*”, ou seja, não estavam na propriedade de cada um do povo romano, em caráter exclusivo, mas eram franqueadas ao uso de todos, como os rios e as suas margens), enquanto

outras eram particulares (*“res singulorum”*, ou seja, que estavam na propriedade de um do povo romano, em caráter exclusivo). Também deram origem à classe *“res universitatis”*, dos bens pertencentes às cidades, sobre os quais a sociedade detinha direitos de usos especiais, uns patrimoniais (estádios e teatros), outros não patrimoniais (vinhas, bosques e pastagens, o dinheiro). Uma classe muito importante para a percepção dos avanços cognitivos da época é a dos *“res communesomnium”*, os bens de usos comum do povo, como o ar, a água corrente e o mar (ALMEIDA, 1961).

Às *“res singulorum”*-coisas particulares, pertenciam, dentre outras coisas, os *“fluminatorrentia”* (rios intermitentes), e a generalidade dos *“rivi”* (pequenas correntes). (Tovar, 2006). As terras, ou seja, o leito e as margens de qualquer rio eram prolongamentos da propriedade marginal. Desse modo, o domínio público sobre a faixa marginal dos rios tinha essencialmente o objetivo de garantir o acesso aos espaços onde estivesse o bem público (água) e não de administração ou proteção da água. (COSTA, 2011). Em síntese, é de 509a.C. a 27 a.C. que se dará a gênese do conceito de “domínio público das águas” associado à captação livre de águas. Mas todo este código, tão bem estruturado, entrará em progressivo declínio a partir de 286 d.C. até ser quase totalmente esquecido (TOVAR, 2006).

Alguns estudos têm apontado que as movimentações humanas em massa podem ser intensificadas por eventos climáticos de grande escala (TIMMERMAN & FRIEDRICH, 2016; GIOSAN *et al.*, 2012; RASHID *et al.*, 2011). Drake (2016) é ciente de que os deslocamentos em massa dos povos não são unicamente devidos às pressões da natureza, mas que esta age na maximização de acirramentos culturais históricos. O autor afirma ter encontrado correlação entre adventos climáticos de porte com as seguidas invasões que desestruturaram e derrubaram o império construído pelos romanos, desencadeando transformações que levaram ao período denominado Idade Média (séculos V ao XV).

A queda de Roma favoreceu o fortalecimento do Feudalismo, um sistema de organização social e política que já vinha se estabelecendo desde a segunda metade do século IV em razão das invasões germânicas. Com a intensificação dos ataques por mais povos bárbaros (eslavos, medos, persas) foi se espalhando por todo o mundo ocidental e se alastrando também por toda a antiga Rússia. (PIRENNE, 1982). O regime feudal implicou profundas modificações nas relações de domínio (posse).

Na época da vigência do sistema feudalista, a Europa se dividiu em vários reinos. Um dos princípios dominantes do regime era o da atribuição ao proprietário do solo de todos ou de quase

todos os direitos que constituíam a soberania; o domínio e a propriedade estavam fundidos. A legislação feudal, porém, veio a atribuir ao rei a propriedade dos rios navegáveis ou dos que se fazem os navegáveis e assim muitas vezes se considerou na prática. O uso dos rios era comum a toda a gente, mas a propriedade era do patrimônio real. Aos senhores feudais era concedido o domínio das pequenas correntes e aquelas intermitentes. (TOVAR, 2006).

O reencontro entre Idade Média com o Mundo Antigo não foi fácil, entretanto, a partir do ano 1054 até o ano de 1204, do acordo firmado entre a Igreja Católica do Ocidente (Roma) e a do Oriente (Constantinopla), o Feudalismo irá começar a sofrer transformação: a exploração camponesa tornar-se-á intensa e concentrada em certas regiões super povoadas deixando áreas extensas de espaços vazios; surgem novas técnicas de cultivo, novas formas de utilização dos animais e das carroças, o que permitiu a produção agrícola garantir um aumento significativo, surgindo, assim, a necessidade de comercialização dos produtos excedentes. Esse renascimento do comércio, principalmente na Itália (Veneza, Nápoles e Florença), mas também da França e Países Baixos, e o consequente aumento da circulação monetária, reabilita a importância social das cidades ocidentais que, com as Cruzadas, tiveram uma reabertura para o mundo, iniciando-se a quebrado isolamento do Velho Mundo.

Dessa reabertura é que irá se estruturar o período que veio a ser conhecido como o Renascimento da Idade Média europeia, que pode ser ilustrado a partir de autores como Dante Alighieri (1265-1321), Francesco Petrarca (1304-1374) e Giovanni Boccaccio (1313-1375). Na Igreja Apostólica Romana, de forte influência estóica, percebe-se o mesmo já a partir de São Tomás de Aquino (1225-1274), com a introdução da ideia aristotélica, que foi aceita pelo clero por que Aquino acrescentara que quem atribuíra a cada ser a sua determinação individual - isto é, a "*physis*" grega, traduzida como "natureza" pelos romanos - fora Deus. Com isso se transforma radicalmente a imagem de "natureza", sendo ela vista fora do homem e o homem fora dela - já que o homem era a imagem e semelhança de Deus (KESSELRING, 2000).

Por outro lado, será somente no século XV, a partir da queda definitiva do Império Bizantino para o Império Otomano, que o feudalismo será deposto no Velho Mundo, com a redescoberta dos clássicos pré-socráticos e de muitos conhecimentos matemáticos e científicos do período áureo helenista, que foram copiados, guardados e, acredita-se, trazidos por povos árabes para a Europa. Assim, não há inovação em Nicolau Copérnico (1473-1543), por exemplo, mas sim uma releitura de Aristarco (310 a.C. a 230 a.C.), o que não deixou de causar um tremendo impacto no *status quo* europeu. Outro aspecto de grande relevância foi que o domínio

otomano fechou as antigas rotas do comércio via Oriente Médio, vindo a resultar nas Grandes Navegações e descobrimento de novas terras, entre elas a ilha de Santa Cruz, dando início à história do Brasil, com sua inserção abrupta, logo no início da Idade Moderna.

A estruturação do arcabouço científico-filosófico que irá florescer recebe como maior herança greco-romana, o padrão relacional sociedade/natureza cristalizado ao redor da idéia de que a interferência entre o desenvolvimento das sociedades humanas e as dinâmicas da natureza se realiza sob a perspectiva de superioridade do primeiro em relação ao segundo. Tal concepção, isolacionista, será traduzida por René Descartes (1596-1650) e Thomas Hobbes (1588-1679), incorporando-se como princípio ético da modernidade no ocidente, ou seja, a visão de total subordinação da natureza ao desejo moderno humano, com seu cunho individualista, materialista e economicista (BATISTELA & BONETI, 2008). A superioridade do homem sobre todas as coisas é vista nesta época como uma lei moral, verdadeira e pura do direito natural e com isso, legítima no direito positivo. (ROMMEN, 2018).

Será por volta desta época que haverá um relevante avanço no Direito Internacional, a partir da organização da sociedade internacional em Estados-Nação que passaram a poder se associar em blocos, parcerias, conforme os interesses - como prevalece nos dias de hoje. Esta mudança suplantará definitivamente o feudalismo da Europa, cujo domínio da água, por regra, deveria ser exclusivo do rei, possivelmente como uma estratégia de defesa frente às invasões bárbaras. Alemar (2006) comenta que isto implicava diretamente na navegação, que era direito exclusivo dos nacionais do reino. O senhor feudal tinha direito de cobrança sobre a navegação, que era regulamentada pelo rei. Isto passou a ser impeditivo para a expansão comercial e somente a partir da tutela jurídica dos cursos d'água, de interesse transnacional, pelas sociedades internacionais é que as questões de soberania entraram numa nova fase discussão.

O homem desse período sentia grande urgência em “humanizar” a natureza através do progresso técnico e econômico, era convicto do merecimento e do direito para tal. A compreensão de “natureza humana” capturada por Hobbes a partir de sua concepção do homem-máquina, de quem não se pode cobrar ética ou moral, será decisiva. O último elemento foi dado por Adam Smith (1723 - 1790), ao considerar que o grande temor moral de Hobbes era na verdade grande oportunidade, ou seja, a ação social individualista movida pelo móbil individual do desejo lhe aparece como recurso maravilhoso na construção de uma nova ordem social. Smith acredita que cada homem é movido por seus próprios interesses. Que cada um se defronta, no mercado, com outros homens também movidos por interesses individuais e que assim, não cabe

esperar um do outro nada presumido de uma bondade imanente, mas tão somente daquele apego que cada um tem a seus próprios interesses, ou seja, ao invés de se apelar para sua humanidade, deve-se apelar para sua auto-estima, e ainda: ao invés de comunicar suas necessidades, será preferível exaltar os ganhos que aquele saná-las poderá ter. (BATISTELA & BONETI, 2008).

Até o final do século XVIII e início do século XIX, a humanidade, apesar de todos os percalços, realizará enormes avanços nos campos dos conhecimentos científicos e filosóficos, contudo, continuará a enxergar a natureza pelo viés de uma nova mítica, compreendida na ideia da inesgotabilidade como um fato advindo do próprio fluxo natural, do surgimento espontâneo a partir do cumprimento de ciclos. A partir da segunda metade do século XIX, a visão da natureza como recurso pela sociedade ocidental será ainda mais ampliada, uma vez que o liberalismo econômico passa a ser assumido como lastro para a consolidação do processo de globalização.

Sob uma vertente normativa, retomando-se o Brasil Colonial, de início vigoravam as Ordenações Manuelinas (1521), que reiterava a tipificação pelo corte de árvores frutíferas e passava a tipificar a caça (com instrumentos capazes de gerar sofrimento no abate) e a comercialização de colmeias (sem preservação das abelhas). Enquanto as Ordenações Filipinas (1603), da época do domínio espanhol, mantiveram essas determinações, acrescentando a proibição de corte de sobreiros, carvalhos e outras espécies, especificamente à beira do rio Tejo em Portugal. Proibiu-se, também, a pesca em locais e épocas determinados e explicitou-se o conceito de poluição ao vedar o lançamento de certos materiais nos rios. (ARAÚJO, 2011; FREIRIA, 2015). Após a independência do país, em sua primeira constituição - “Constituição do Império de 25/03/1824, embora não tenha tratado explicitamente dos recursos hídricos, disciplinava acerca da propriedade. E, nesse sentido, estabelecia estar implícito na propriedade do solo tudo nela agregado, bem como a do subsolo, portanto, das águas dos lagos, lagoas e subterrâneas” (ARAÚJO, 2011).

Vê-se assim que, apesar de incipiente, existia um pequeno corpo normativo disciplinando a posse e limites de posse sobre recursos naturais a que virá a sofrer, ainda mais invisibilização, com a proclamação da independência do Brasil, em 1822, quando deixam de valer as velhas Ordenanças Imperiais. Em seguida, a lei 601 de 1850 - “Lei das Terras” vem evidenciar o propósito do direito brasileiro de assegurar as terras como propriedades privadas ou públicas, para que, a partir da definição de um regime jurídico, pudessem ser tratadas como mercadorias, não aparecendo qualquer menção ou restrição, no texto, ao uso e proteção dos recursos naturais presentes nesse território em discussão. Pelo contrário, segundo o art. 6º da Lei de Terras, a eliminação de recursos naturais (seja por meio de “roçados, derribadas ou queima de mattsos ou

campos”), acompanhados da situação de morada habitual e realização de cultura efetiva, era condição para se assegurar o direito de propriedade (FREIRIA, 2015). Não era muito diferente disso o que se passava em todo o ocidente (inclusive o Novo Mundo), em maior ou menor grau.

O movimento romântico entre os séculos XVIII e XIX merece destaque como a primeira reação aos paradigmas cartesiano e industrial, principalmente na Inglaterra, onde as raízes de um movimento ambientalista mais amplo podem ser discernidas pela primeira vez já na segunda metade do século XIX, quando grupos protecionistas foram criados. Nos Estados Unidos do final do século XIX, um movimento bipartido de preservacionistas de áreas virgens e de conservacionistas de recursos naturais começou também a emergir (MCCORMICK, 1992). Mas, até a primeira metade do século XX, muitos problemas ambientais foram realmente identificados e relatados, mas não se tratava de um assunto de pauta coletiva em nenhum lugar do mundo e somente seletos e pequenos grupos de argutos observadores é que tinham tais preocupações. Afora Inglaterra, E.U.A. e no máximo França, o que se poderia destacar no restante do mundo seria basicamente a criação dos Parques Nacionais, por alguns poucos países, visto que ideologicamente tais áreas são especialmente protegidas com fins de visitação, para contemplação da natureza “livre”, idílica, em consonância com o conceito inglês: *wildness*.

Retomando-se o Brasil, agora do período imperial, no século XIX, quando se iniciava a implantação de serviços de abastecimento de água através da construção de chafarizes, fontes e bicas, que apesar de serem de livre acesso público produziam rendimentos àqueles investimentos do capital estrangeiro que detinham direitos e privilégios contratuais sobre as obras. A cidade do Rio de Janeiro contava com abastecimento público desde 1750, realmente independente, herdado do período colonial. Na segunda metade do século XIX, processou-se a transição do modo de distribuição coletiva e gratuita para o modo baseado em redes de distribuição domiciliares. Especificamente em São Paulo, em 1875, foi criada a Companhia Cantareira de Águas e Esgotos, que irá desativar e demolir os chafarizes públicos na medida em que amplia a cobertura por rede de abastecimento residencial. Assim se estabelece o processo de mercantilização da água por meio do serviço de abastecimento público, da apropriação e comercialização de um bem até então tratado como bem de acesso irrestrito. (MURTHA *et al.*, 2015).

No início do século XX, com o Brasil já republicano, seu Código Civil, promulgado em 1º de janeiro de 1916, em seu art. 584 vedava realizações de construções capazes de poluir, ou inutilizar água de poço ou de fontes preexistentes. Reconhecendo-se, de maneira isolada, dentro de um código criado para reger relações privadas, a importância da água enquanto recurso natural

(FREIRIA, 2015). Já o Decreto no 4.421 de 1921 foi criado o Serviço Florestal do Brasil (SFB), vinculado ao Ministério da Agricultura, encarregando-o da conservação, beneficiamento, reconstituição, formação e aproveitamento das florestas. Que na esfera normativa trazia inovações relevantes em direção a uma visão mais integrada da proteção dos recursos naturais.

No Decreto de criação do SFB foram previstas, entre outras coisas, as florestas protetoras, assim consideradas as que exerciam as funções de: beneficiar a higiene e a saúde pública; garantir a pureza e abundância dos mananciais; equilibrar o regime das águas correntes; evitar os efeitos danosos dos agentes atmosféricos, impedir a destruição produzida pelos ventos, obstar a deslocação das areias movediças como também os esbarrocamentos, as erosões violentas, quer pelos rios, quer pelo mar; e auxiliar a defesa das fronteiras. Foi previsto que somente em casos de grande vantagem para a riqueza pública seria permitido, mediante licitação, o aproveitamento econômico de produtos das florestas protetoras de domínio da União, mas com a obrigação de replantio. Havia referência também a florestas modelos, para o exercício os das escolas de silvicultura, como também em reservas florestais e parques nacionais, bem como em guardas florestais (ARAÚJO, 2011). Esta legislação, que antecede em muito a existência do ambientalismo, demonstra que não foram grandes os avanços normativos na proteção e compreensão da importância das florestas até momento.

Entretanto, não se pode ignorar que inexistiam políticas direcionadas ou mesmo qualquer provisão de recursos com vistas a fazerem valer as regulamentações, o que só se modificará a partir do primeiro período Vargas, de 1930 a 1945, de onde se destacam o Código Florestal (1934), o Código de Caça e Pesca (1934), Código de Águas (1934) e o Decreto de Proteção dos Animais (1934), Código de Minas (1940). Observando-se certa importância dada à qualidade das águas, a partir do Decreto-lei nº 2.848, Código Penal, que entrou em vigor em 1º de janeiro de 1942, trazendo uma previsão punitiva específica relativa à questão da água em seu art. 271: “Corromper ou poluir água potável, de uso comum ou particular, tornando-a imprópria para consumo ou nociva à saúde. Pena-reclusão, de 2 (dois) a 5 (cinco) anos.” (FREIRIA, 2015).

Em relação ao primeiro Código das Águas brasileiro, o Decreto nº 24.643 de 1934, é dividido estruturalmente em duas partes. A primeira trata das águas em geral e de seu domínio, enquanto a segunda trata do aproveitamento dos potenciais hidráulicos e estabelece uma disciplina legal para geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Deste mesmo período, internacionalmente, pode-se destacar sobre a temática dos potenciais hidráulicos: as Convenções de Berna, assinadas em 1913 e 1914, referentes à exploração de energia hidrelétrica

para os rios Ródano e Roya, que delimitam as fronteiras entre a França e seus vizinhos Suíça e Itália, respectivamente; a Convenção de Genebra relativa ao desenvolvimento de forças hidráulicas que interessam a múltiplos estados, assinada em 1933 (ALEMAR, 2006). Desse modo, a legislação brasileira é reativa e enfatiza a administração dos recursos naturais, de forma setorial onde para cada problema ou demanda relacionada a aspectos da natureza, uma nova legislação foi criada, tão somente para que os usos do território e de seus recursos naturais fossem voltados ao desenvolvimento econômico. Conforme Oliveira (2018), o setor de energia eletro-hidráulica nacional teve início ainda no século XIX e nele prevalecia o capital privado internacional e o código das águas vinha em primeira mão para disciplinar a questão, mas, posteriormente, serviu bem à estatização do setor, o que é curioso.

Será somente na segunda metade do século XX que a questão ambiental, como a compreendemos, emergirá de forma generalizada no planeta. Na Segunda Guerra Mundial, com as explosões das bombas atômicas nas cidades japonesas de Hiroshima e Nagasaki, o “mundo” seria despertado para uma sensação de encurtamento de distâncias, sofrendo uma profunda transformação em sua visão da segurança planetária. Os impactos negativos de um expansionismo desenfreado propiciarão o início de grandes manifestações pelo bem do Meio Ambiente uma vez que a humanidade se torna atenta para o fato de que os recursos naturais são finitos e que seu uso incorreto interferirá nos limites de sua própria existência (MCCORMICK, 1992).

A formação do conceito de meio ambiente e de um movimento ambientalista socialmente abrangente ocorrerá assim, no início da segunda metade do século XX, num momento histórico conturbado pela ascensão sucessiva de movimentos sociais, sendo os principais deles a respeito da igualdade racial, direitos das mulheres e o movimento pela paz mundial e fim das guerras. A partir da década de 1960, um movimento que tomará quase todo o mundo ocidental vai ganhando força: a contracultura, que se originou nos Estados Unidos, disseminando-se por vários outros países muito rapidamente; nesse movimento, não se criticava exclusivamente o modo de produção, mas fundamentalmente o modo de vida, o que irá ser um importante ingrediente na congregação social em prol da Natureza. Todos estes movimentos das massas urbanas foram preparando terreno para o surgimento de um movimento ambientalista extremamente forte que atrairá o interesse das principais lideranças globais.

Segundo McCormick (1992), o movimento ambientalista foi “um produto de forças tanto internas quanto externas a seus objetivos imediatos. Os elementos de mudança já vinham

emergindo muito antes dos anos 1960 e quando finalmente se entrecruzaram uns com os outros e com fatores sócio-políticos mais amplos, o resultado foi uma força nova no sentido de mudança social e política” (p. 72), com aspectos autônomos e atuações que compreendiam desde aquelas de cunhos mais pacifistas até aquelas do ecologismo utópico.

A publicação de “Primavera Silenciosa”, da jornalista americana Rachel Carson, no ano de 1962, é considerada um clássico do movimento ambientalista. O livro promoveu uma discussão em nível internacional, pela forma contundente como denunciava a diminuição da qualidade de vida devido ao uso excessivo de agroquímicos na agricultura, a exemplo do DDT. Carson detalha os efeitos adversos da má utilização de venenos cumulativos na cadeia trófica, o que gerou muita controvérsia e aumentou a consciência pública quanto às implicações da atividade humana sobre o meio ambiente e quanto a seu custo, por sua vez, para a sua própria vida e sobrevivência.

A disseminação das redes de TV, a politização da questão ambiental, o direcionamento midiático e duras intervenções contra movimentos sociais de forma geral fizeram com que o movimento ambientalista fosse tomando formato. A década de 1970 foi marcada tanto pela grande intensificação da criação de organizações não governamentais com o propósito de discutir os problemas ecológicos em âmbito mundial como também pelo surgimento dos primeiros movimentos ambientalistas organizados com ampla participação popular e visibilidade nos meios de comunicação. Foi ainda nessa década que se deu início ao aparelhamento do poder público, como por exemplo, a expansão das agências estatais de meio ambiente e a criação dos partidos políticos voltados para a questão ambiental, com destaque para os partidos verdes.

No Brasil, antes da década de 1970 não havia um movimento ambientalista, e as questões relacionadas à temática ambiental continuavam tratadas pontualmente a partir do processo cognitivo de vários agentes, principalmente do serviço público e, para além disso, dos marcos na esfera legal, com a criação de leis substitutivas daquelas da década de 1930, como o Código Florestal de 1965 (Lei 4.771/65), a Lei de Proteção da Fauna (Lei 5.197/67), o Código de Pesca (Decreto-lei nº 221/67), o Código de Mineração (Decreto-lei nº 227/67). Era o período da ditadura militar brasileira, propondo-se a resolver os problemas associados ao desenvolvimentismo, tais como o processo de evasão rural e o crescimento desordenado das cidades. Para isso, contavam com um documento formulado pelos países americanos, a Carta de Punta del'Este (1961), onde foram pactuadas diretrizes para a elevação do nível de atendimento de 70% das populações urbanas com serviços de água e de esgoto e o de 50% para as populações

rurais. No acordo, estabelecera-se um programa decenal para o cumprimento das metas e deste modo, com o Decreto-lei nº 248/67, foi instituída Política Nacional de Saneamento Básico que já incorpora a preocupação em harmonizar seus preceitos com a Política Nacional de Saúde (FREIRIA, 2015).

Segundo McCormick (1992), a crise ambiental na década de 1970 “não era mais uma crise silenciosa. Um novo movimento de massas tinha surgido e uma nova questão estava começando a encontrar seu caminho para a agenda de políticas públicas” (1992, p. 78). A progressiva intensificação normativa, para regulação da natureza, dá-se imediatamente após a cúpula ambiental de 1972, em Estocolmo, onde o Brasil - juntamente com a China - exerceu liderança entre os países “subdesenvolvidos”, representando uma oposição aos “Limites do Crescimento”. No contexto das políticas públicas brasileiras, relacionadas a aspectos ambientais, surgem os Planos Nacionais de Desenvolvimento (PND) onde Freiria (2015) aponta que, no ano de 1974, aprova-se um segundo PND para o período que vai de 1975 a 1979, por meio da Lei nº 6.151, datada de 4 de dezembro de 1974. Este documento enfoca os aspectos ambientais de maneira diferenciada, destacando a posição que deveria ser adotada pelo país no cenário internacional, além de apontar diretrizes para políticas ambientais. Isto permite demarcar a tentativa de resistir às pressões internacionais no sentido de controlar o nível de acesso aos recursos naturais dos países tidos como subdesenvolvidos.

De todo modo, Costa (2018) afirma que será mesmo na década de 1970 que o movimento ambientalista irá se tornar verdadeiramente ativo, com reação social ao perceber que não se pode mais viver ignorando o que ocorre ao redor; o descaso com o meio ambiente se torna repugnante e a falta de cuidados e desinteresse causa insatisfação. Pode-se afirmar que, inicialmente, o movimento tinha como seu principal modo de atuação a denúncia, sendo contrário ao modelo das políticas governamentais e industriais, enquanto a sua forma de protesto dava-se através das militâncias, no sentido de contestar a ordem estabelecida. Essa característica era reflexa de diversos movimentos que já existiam em países mais “desenvolvidos”, principalmente França e Inglaterra. A Noruega finca sua bandeira como o primeiro país a estabelecer seu Ministério do Meio Ambiente, em 08/05/1972, assim que saiu da conferência de Estocolmo.

O fim dos anos 70 é marcado pelo aumento progressivo na criação de ONGs- financiadas pelo capital internacional - já que não se poderia apenas esperar que os governos tomassem a iniciativa com projetos de preservação. Essa “nova” ideia marca o início dos anos 80, década em que Ignacy Sachs publicou “Ecodesenvolvimento: crescer sem destruir”, que influenciou

grandemente o meio científico de alguns países, inclusive o Brasil. Freiria (2015) informa que, no âmbito normativo, foi publicada a Lei nº 6.803/80, substitutiva do Decreto-lei nº 1.413/75, no sentido do controle da poluição industrial, onde já se vislumbravam os primeiros sinais de regulamentação da poluição como externalidade do processo produtivo e também os primeiros sinais de regulamentação de formas de planejamento para os usos e parcelamentos do território urbano. O autor enfatiza que, no conjunto de leis existentes até o início da década de 1980, a proteção ambiental era tratada de forma diluída e na exata medida de atender sua exploração pelo homem, sem qualquer sinal no horizonte que apontasse para a definição de uma política pública ambiental para o país.

O conceito de ecodesenvolvimento emerge pela primeira vez em 1973, nos pronunciamentos de Maurice Strong, Secretário da Conferência de Estocolmo (RAYNAUT e ZANONI, 1993), e é largamente difundido por Ignacy Sachs, a partir de 1974 (GODARD, 1991). Em linhas gerais, ecodesenvolvimento significa um estilo de desenvolvimento voltado para as especificidades de cada ecorregião, levando em conta não somente os seus aspectos ecossistêmicos, como também os culturais. O ecodesenvolvimento parte da crítica ao desenvolvimento em prol da economia, denunciando o reducionismo causador de problemas socioambientais e exalta o valor de soluções endógenas, objetivando garantir para as gerações futuras igual disponibilidade de recursos naturais e com as mesmas qualidades.

Após a Conferência de Estocolmo, emergem quatro principais correntes de pensamento. A primeira, dos preservacionistas, passa a defender o desenvolvimento zero, baseado em documentos técnicos como “Limites do Crescimento”, que apresentava previsões negativas sobre a preservação ambiental, através de um crescimento populacional exponencial juntamente a um aumento da fome, uma vez que os sistemas considerados no documento teriam seus tetos máximos de sustentação. A segunda corrente trata dos marxistas que baseados no mesmo documento e no manifesto pela sobrevivência, atribuíam ao sistema capitalista o ônus da destruição ambiental, com pretensões de substituir a produção de produtos “supérfluos” por produtos considerados básicos ou essenciais (COSTA, 2018).

Os fundamentalistas, pertencentes à terceira corrente, pautavam-se na teoria de Gaia, atribuída a James Lovelock, pregando que o ser humano não poderia influenciar o meio natural por ser apenas mais um ser vivo dentro de um sistema complexo. Os ecotecnicistas, pertencentes a quarta e última corrente, afirmavam que os problemas ambientais poderiam se resolver através do desenvolvimento econômico e das novas tecnologias (COSTA, 2018). No Brasil, dentro

dessas correntes, podem-se associar as características de pensamento do movimento ambientalista as três formas de atuação mais racionais, enquanto a vertente voltada para o lado espiritual é minoria.

Não demorara e o Brasil lança, em 1981, a Política e o Sistema Nacional do Meio Ambiente entram em vigor, com a Lei 6.938/81, proporcionando novas diretrizes para o direito brasileiro, responsabilizando os causadores da destruição natural e permitindo a cobrança de indenização por dano ambiental. Para a complementação da lei eram utilizados o Código Florestal, o Código das Águas, o Código da Fauna, entre outros, gerando sobreposição, superposição, quando não o conflito, entre dispositivos legais e instituições que, ainda que parcialmente equacionados com a criação do SISNAMA pela Política Nacional em 1981, produziram um mosaico institucional de regras, princípios, instrumentos e órgãos ambientais que refletem efeitos na realidade atual (FREIRIA, 2015).

Em julho de 1982, no Brasil, às margens das cataratas de Foz do Iguaçu, em Guaíra, cerca de três mil pessoas participaram de um *quarup* em protesto contra a construção da hidrelétrica de Itaipu, que ameaçava o Parque Nacional de Sete Quedas. Organizado por uma coalizão de pequenos grupos ambientalistas de diversas regiões do país, o *Quarup* Adeus Sete-Quedas incluiu atos políticos e culturais ao longo de três dias. Itaipu era uma das obras magnas do plano desenvolvimentista levado a cabo pelos governos militares. Ao contestá-la, os ativistas ambientalistas contestavam, em decorrência, o próprio regime autoritário (ALONSO, 2007). No início da década de 1970, no Rio São Francisco, observou-se a resistência da população - como no caso da barragem de Sobradinho, momento marcado por manifestações e ocupações no escritório da Companhia Hidrelétrica do São Francisco (CHESF) em Sobradinho, Bahia, por parte dos representantes de comunidades ameaçadas (ROCHA e SOARES, 2011).

Mas será somente em 1985, no Brasil, que se instituirá uma pasta para o Meio Ambiente, que de tão turbulenta é marcada por sucessivas mudanças nas suas designações e competências. (MOURA, 2016). A institucionalização da questão ambiental após a divulgação do relatório Brundtland - Nosso Futuro Comum, em 1987, será progressiva, conglomerando-se bem com a hegemonia das organizações não-governamentais (ONGs) que vinham sendo formadas desde o final da década de 60. Do acordo que se tecerá entre as duas correntes preponderantes emergirá o discurso da sustentabilidade. Sua tradução será expressa na aceitação de medidas mitigadoras tornariam o crescimento econômico sustentável.

Este discurso será incorporado pelos “representantes” dos movimentos sociais e será nos moldes de um protocolo de atitudes do “homem civilizado”, pautando temas como a atenção quanto às questões como a reciclagem dos materiais descartados (plástico, latinha e papel), o consumo consciente, o aproveitamento e o tratamento de resíduos, os cuidados com o ar, com os níveis dos ruídos, e, como carro-chefe, a preservação da biodiversidade, marcado pelo emblemático movimento para “salvar” as baleias da extinção. Na prática, como informa Layrargues (1997), ocorreu um movimento de dupla conveniência entre Norte e Sul, de modo que o primeiro busca omitir a poluição da riqueza, enquanto o segundo busca obter investimentos para mitigar a pobreza; assim, os interesses particulares orquestraram-se em total harmonia.

É importante destacar que, no período pós-Brundtland, o clímax do embate mais intelectualizado que ocorria no Brasil, resumia-se ao delineamento das diferenças entre os conceitos de “ecodesenvolvimento” e “desenvolvimento sustentável”. Na verdade se tratava muito mais de uma discussão acerca do alinhamento político-ideológico do que acerca do conhecimento “real” das interações homem-natureza, das variáveis, atributos e processos envolvidos. Contudo, a crítica ao novo conceito é válida, como se vê na argumentação de Layrargues (1997) ao destacar que a visão de “desenvolvimento sustentável” contida no relatório Brundtland dá ênfase particular às consequências da pobreza sobre o meio ambiente, sugerindo uma circularidade com retroalimentação positiva, isto é, quanto mais pobre, maior pobreza haverá e com isso maior degradação. Ademais, o autor afirma que, a partir daí, ocorre uma intensa propaganda em torno do círculo vicioso da pobreza, em busca de justificar a necessidade de manter o crescimento econômico, omitindo o peso da responsabilidade ambiental do consumo excessivo do Norte (LAYRARGUES, 1997).

O relatório “Nosso Futuro Comum” vem promover a crença que as inovações tecnológicas certamente permitirão eficiência ecológica e energética e, com isso, o acesso de todos os povos à fartura. O discurso ideológico da Comissão Brundtland acentua a erradicação da pobreza como a tônica do desenvolvimento sustentável e ao invés de levar em conta a possibilidade do “teto” previsto em “limites do crescimento” prefere reconhecer a necessidade de se estabelecer um “pisso” de consumo material para pobres (LAYRARGUES, 1997). No dia 5 de outubro de 1988, foi promulgada a atual Constituição Brasileira, trazendo em seu corpo um capítulo inteiro dedicado às questões ambientais onde, no parágrafo 1º do artigo 225 são enumerados os deveres do Poder Público, a exemplo do inciso VI do parágrafo: “Promover a educação ambiental em todos os níveis de ensino e a conscientização pública para a preservação

do meio ambiente”. Daí em diante, pode-se afirmar que a legislação ambiental brasileira procurará sintonizar-se cada vez mais aos princípios gerais internacionais da ONU.

Em 22 de fevereiro de 1989, a Lei 7.735 deu início aos trabalhos do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente (IBAMA), representando a fusão de quatro secretarias já existentes: a Secretaria do Meio Ambiente (SEMA), a Superintendência da Borracha (SUDHEVEA), a Superintendência da Pesca (SUDEPE) e o Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal (IBDF). Segundo Costa (2018), a convergência de interesses do Estado e da sociedade civil, emergente a partir da década de 80, permitindo a ampliação da agenda ambientalista, fortalecendo os interesses de conservação do meio ambiente e legitimando os primeiros passos do movimento ambientalista contemporâneo. Nesse período, acredita-se em uma transformação através da influência política no campo dos direitos, caracterizado por uma influência participativa nas políticas dos órgãos estatais de meio ambiente.

A década de 90, segundo Silva-Sánchez (1999), representou um momento de expectativa para uma consolidação democrática, com o marco de após mais de duas décadas de governos autoritários, um presidente democraticamente eleito. O governo de Fernando Collor de Mello foi importante para o debate ambiental pela possibilidade de explicitar a complexidade social presente na problemática ambiental. Durante uma “segunda onda ambientalista” mundial, fora incorporada a questão ambiental como um dos pontos de uma agenda de governo, dando início à revitalização de um “discurso verde”.

O Brasil entrará em pauta recebendo destaque para sediar o mais importante acontecimento mundial na área ambiental, depois de vinte anos da Conferência de Estocolmo, a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento será realizada no Rio de Janeiro, em 1992, conhecida no Brasil como ECO-92 ou Rio-92, e contou com representantes de 179 países, incluindo aproximadamente 100 chefes de Estado. A escolha da cidade do Rio de Janeiro para sediar o evento mostrou que o Brasil tornava-se centro da preocupação ecológica mundial, sendo a Amazônia a referência de área geoestratégica, em razão da incomparável riqueza desse patrimônio natural.

As iniciativas do governo Collor em prol do meio ambiente tinham por objetivo tranquilizar os Estados Unidos e os países europeus quanto à degradação ambiental do Brasil, a nomeação de um ambientalista para integrar a equipe do governo, a aceleração da demarcação de terras indígenas e o reforço do poder de fiscalização de órgãos tais como o IBAMA. Porém, é possível compreender que o governo Collor apropriou-se do discurso ambientalista visando

apenas aumentar e manter sua popularidade. (SILVA-SANCHEZ, 1999).

Instituída pela lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, conhecida como Lei das Águas, a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) permitiu o estabelecimento de instrumentos para a gestão dos recursos hídricos de domínio federal - que atravessam mais de um estado ou fazem fronteira - criando o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH). A lei possui caráter descentralizador, por criar um sistema nacional que permite a integração entre a União e estados, e participativo, por instalar comitês de bacias hidrográficas que unem poderes públicos nas três instâncias, usuários e sociedade civil na gestão de recursos hídricos. A centralidade das questões hídricas na temática do meio ambiente vai passando despercebida até este momento e sua governança vai sendo lançada a um patamar de grande complexidade.

A uniformização da legislação hídrica é facilmente percebida no âmbito internacional e nacional, pois inúmeros países adotaram instrumentos econômicos de gestão e privatizaram os serviços de distribuição e tratamento, sendo nítida a interferência sofrida pelo Direito de outras normas e valores (HENKES, 2008). As políticas nacionais do meio ambiente e dos recursos hídricos se constituem assim dissociadas, o que será favorecido ainda mais com a divisão institucional e sucessivas ações para restringir cada vez mais as atribuições do IBAMA, o que foi bastante estratégico para o aparelhamento setorial das águas, que sai fortalecido com a criação ainda da Agência Nacional de Águas. Finalmente, com o projeto de implantação de um Estado Mínimo e uma estratégia para descentralização da gestão das mãos do poder público, em prol da Participação Popular (entendida a partir de resultados em eventos, não deliberativos, tais como “consultas públicas” e “audiências públicas”), passa a transitar nos cenários político-econômico-institucionais os Comitês de Bacias Hidrográficas e suas Agências Executivas.

Nas palavras de Empinotti (2011), a característica deliberativa dos fóruns participativos é desconsiderada pelo Estado, tornando-se, na prática, apenas entidades consultivas. Assim, o espaço de negociação das organizações da sociedade civil nas ações de desenvolvimento e uso da água na bacia é virtual, enquanto o Comitê da Bacia Hidrográfica do rio São Francisco pode ser visto como mais uma instituição descentralizadora, sem autonomia e influência no processo de aprovação das ações do Estado. Desse modo, o que quer que venha a ser discutido nos fóruns de participação social servirá tão somente para municiar o discurso em defesa dos grandes interesses, instruindo-os, o que resume tais eventos ao nível puramente midiático com vistas unicamente a legitimar e dar aceitação às grandes empreitadas propostas.

A institucionalização da agenda do “desenvolvimento sustentável” passa a ser promovida pelo Estado a partir da criação de leis e agências reguladoras, enquanto o capital privado irá adotar os critérios tocantes à ecologização dos projetos de grandes obras. Em sinergia, favoreceram a aceleração da liberação de licenças para a implantação dos grandes projetos, gerando um cenário preocupante quanto ao meio ambiente neste início de século XXI, podendo causar impactos socioambientais incalculáveis e pequeníssima possibilidade de reparo.

Porém, esse fator é muitas vezes menosprezado a partir da visão economicista do Estado e de seus governantes, que prezam pelo crescimento econômico em detrimento do equilíbrio com a natureza e a partir da própria sociedade. Esta, por sua vez, vem perdendo sua capacidade de organização diante do engendramento do processo de sedação presente no mecanismo de Participação Popular que tem funcionado na prática democrática brasileira.

Percebe-se sempre grande interesse das Nações Unidas no aparelhamento da questão ambiental no país, mas turva-se a compreensão desse processo diante do grande número de interações, interesses e atores que o assunto envolve. A característica mais marcante das últimas quatro décadas tem sido: na primeira metade, a proteção da Amazônia e na segunda, o fortalecimento da temática relacionada à governança das águas. Essa ênfase que apresenta um viés relevante quando se considera o número impressionante de autorizações e execuções dos projetos de grandes obras voltadas para o setor hídrico, a exemplo da implantação de hidrelétricas, transposição de rios, programas de revitalização de bacia hidrográfica. Como no caso da bacia hidrográfica do rio São Francisco, a qual elenca todas estas intervenções simultaneamente e que tem em seu plano decenal (2016-2025) listadas previsões de grandes investimentos para a renovação e ampliação do modal de transporte hidroviário, pavimentação acessos mais largos ao crescimento econômico e concentração das riquezas presentes nas terras por ele drenadas.

Sempre contraditório, o segmento ambiental do poder público brasileiro consegue tomar caminhos diversos, que vão se alternando, oras num sentido, oras noutro. Se entre as décadas de 80 e 90, fazia-se acreditar mais em seus interesses na proteção e preservação, em épocas mais recentes apresenta-se mais pelos interesses na revisão normativa, no repasse e diluição das competências de controle e fiscalização cabíveis entre os entes federados, no esforço para efetivar renovações normativas que flexibilizem e dêem maior agilidade ao licenciamento/regularização das grandes obras e empreendimentos onde se especula até a possibilidade de auto-licenciamento. Os revezes da ONU em relação ao meio ambiente, podem

ser percebidos, por sua parte, nos direcionamentos contraditórios e poucos resultados apresentados nas cimeiras que foram sucedendo Estocolmo.

Em setembro de 2002, a Organização das Nações Unidas (ONU) patrocinou a Rio +10, na África do Sul, cujo principal objetivo era avaliar os acordos e convênios ocorridos na Rio-92, além da busca por um consenso avaliativo quanto às condições ambientais e sociais visando ações futuras. De acordo com Little (2003), os resultados não estavam nem próximos do que era esperado quando afirma que os resultados exibidos em Johannesburgo foram mínimos, sendo que, em alguns casos, houve retrocesso.

A Organização das Nações Unidas, se de início demonstrava preocupação com o aumento da extensão territorial e com a biodiversidade a serem protegidas nos países “subdesenvolvidos”, hoje se atém em viabilizar “sustentabilidade” para o crescimento econômico. O Brasil age como país satélite, o que se agrava com suas fortes disputas internas, sendo um notório retardatário e faltando-lhe originalidade e autonomia. O atual cenário do ambientalismo globalizado é pouco animador e é pontuado somente em relação à signatariedade, ou não, às convenções internacionais, a exemplo do emblemático compromisso com a redução da emissão de gases do efeito estufa na atmosfera, que parece ter sido extinto na questão dos CFCs (Clorofluorcarbonetos) dos aparelhos de refrigeração. A biodiversidade ainda é pontuada, mais em virtude de algumas ONGs, fortes atuantes nesta causa, e ações individuais de atores idealistas mais engajados do que à própria expectativa da efetividade da proteção do Estado que é completamente alienado e lento diante da dinamicidade ambiental.

Neste ponto, a temática da água pode ser tomada como referência, dada sua essencialidade e fundamentalidade. Deste modo, o trato dado pelo homem à questão torna-se o melhor referencial para identificação de mudanças de paradigma do seu entendimento sobre a natureza. Conforme a teoria paradigmática de Thomas Khun (1962), o fenômeno de transição entre paradigmas, normalmente, pode não se dar de maneira abrupta. Identificando-se as discontinuidades nas normas positivas relativas à água, vigentes ao longo do tempo, isto se torna bastante nítido.

Contemporaneamente, pode-se identificar a emergência de conflitos normativos, com a emergência da questão ambiental. No caso da água, assiste-se à inserção de um viés ecológico na sua gestão. Destarte a polêmica questão da cobrança objetiva da água, sob a perspectiva de privatização, observa-se o desabrochar da percepção do direito do ambiente a partir da concepção do direito da água. Neste contexto insere-se a normativa Diretiva Quadro da Água (DQA) da

União Europeia, uma organização supranacional composta por vinte e sete Estados-Nação. A DQA difere dos tratados e acordos das conferências internacionais, na medida em que é explicitamente voltada para instruir (padronizando) o conteúdo das normas dos Estados-Membros. (SARAIWA, 2010).

Apesar de não deixar de manter o caráter utilitarista em relação à natureza, a DQA objetiva evitar a degradação, protegendo e melhorando o estado dos ecossistemas aquáticos, dos ecossistemas terrestres associados e das zonas protegidas. Ou seja, os ecossistemas aquáticos e não somente a água, passam a ser objeto de direito, devendo ser protegidos e melhorados. Além disso, como a água, com seu ciclo hidrológico, compreende um sistema acoplado, a norma estende tais direitos também aos ecossistemas terrestres associados e zonas protegidas, abrangidos no seu bojo.

Uma visão integrada vai passar assim a ser garantida pela água, mudando significativamente aquela percepção identificada nas regulamentações anteriores, onde prevalecia o critério da distinção para proteção. Protegiam-se indivíduos, uma espécie, um grupamento de espécies através de listagens ou da proteção de extensas áreas, enfim, na tentativa de embutir o conceito ecossistêmico na medida em que estava implícito, mas sem integrá-lo. A ampliação e comunhão das concepções de listagens e de áreas foram positivas, claro. Visto serem livres o ar e a luz solar, protegendo-se espécies da vida silvestre ou as terras, já se protegia muito, contudo faltava um elemento integrativo e este é encontrado na água.

A concretude da água, enquanto recurso compartilhado transaccionalmente, tornara o alcance do seu “bom potencial ecológico” objetivo comum na Europa, que enxerga na uniformização de metodologias e processos para definição do potencial ecológico um modo de todos os países atingirem resultados comparáveis entre todos. Estabelecer-se como pressupostos especiais que os custos e intervenções devessem ser mínimos para que as metas e prazos fossem alcançáveis por todos o que, relativamente, compromete a responsabilidade ecológica do modelo europeu. Assim, a Diretiva-Quadro da Água serve como demarcação de uma mudança da perspectiva humana, abrindo possibilidades de se ampliarem investimentos para proteção e melhoramento do hidro-ecossistema, conforme evolua. Assim, conclui-se que não é algo tão impossível de se acreditar agora que algum dia o homem haverá de sentir certa vergonha por ter barrado algum rio perene.

2.2. Modelagem Hidrológica

Aristóteles pode ter sido o primeiro a sugerir que os rios eram alimentados pelas chuvas, sendo a sua maior dificuldade explicar a origem da água subterrânea. Somente na época de Leonardo da Vinci (por volta de 1.500 d.C), a ideia da alimentação dos rios pela precipitação começou a ser aceita. No entanto, foi apenas no ano de 1694 que Perrault, através de medidas pluviométricas na bacia do rio Sena, demonstrou experimentalmente, que o volume precipitado ao longo do ano era suficiente para mais que manter o volume escoado no exutório do rio (STUDART, 2006).

Pouco antes de Perrault, o astrônomo inglês Halley, em 1693, provou que a evaporação da água do mar era suficiente para responder por todas as nascentes e fluxos d'água. Mariotte, em 1686, mediu a velocidade do rio Sena. Estes primeiros conhecimentos de Hidrologia permitiram inúmeros avanços no Século XVIII, incluindo o teorema de Bernoulli, o Tubo de Pitot e a Fórmula de Chèzy, que formam a base da Hidráulica e da Mecânica dos Fluidos (STUDART, 2006).

Durante o Século XIX, foram feitos significantes avanços na teoria da água subterrânea, incluindo a Lei de Darcy. No que se refere à Hidrologia de águas superficiais, muitas fórmulas e instrumentos de medição foram criados. Pode-se dizer que neste período surge o primeiro modelo hidrológico, o método racional, proposto pelo engenheiro irlandês Thomas James Mulvaney em 1851. (RUIZ, 2008)

De maneira simplificada, os modelos matemáticos podem ser definidos como representações do comportamento do sistema físico, ou seja, qualquer engenho que responda através de uma saída a uma entrada. Não deixando de ter em conta a impressão bastante justa quanto à mecanicização da natureza, é claro, mas não se pode desconsiderar que diante do constante crescimento urbano e do aumento das necessidades por água limpa, o uso de ferramentas que auxiliem na boa gestão deste recurso, visando garantir sua disponibilidade futura, é imprescindível. O fato de se apegar ao uso de princípios da física, da matemática e de demandar tecnologia não torna a modelagem vilã na sua relação com o natural, isto se encerra mais nas questões, como diria Lacey (2009), dos valores envolvidos na apreensão, decisões e aplicações dos conhecimentos adquiridos.

Chow, Maidment e Ways (1988) lembram que no início do século XX a hidrologia era predominantemente empírica, mas exemplificam que o racionalismo na análise dos dados

observados começará a marcar presença como em Green e Ampt (1911) que desenvolveram um modelo fisicamente baseado para infiltração, Richards (1931) derivou a equação para fluxo insaturado, Horton (1933) desenvolveu a teoria da infiltração, entre outros.

Tucci (1998) argumenta que a busca da solução na engenharia levou a hidrologia para a ênfase no processo da quantificação dos principais sistemas envolvidos nos projetos, onde os objetivos eram moldados pelo dimensionamento de reservatórios, previsão de vazão em tempo real, extensão de séries para análise de enchentes ou estiagens. Segundo o autor, nos aproveitamentos dos recursos hídricos, os aspectos ambientais não eram sequer questionados e a visão econômica dos benefícios estava voltada fundamentalmente para o crescimento econômico. Progressivamente, com as questões da deterioração dos recursos naturais, criou-se uma preocupação maior com a quantificação do impacto da exploração humana.

Os problemas ambientais no “mundo desenvolvido” foram destacados pela contaminação de aquíferos conforme o homem começou a enterrar seus despejos e os hidrólogos tiveram que reciclar conhecimentos, já que o escoamento subterrâneo era pouco conhecido para que o problema pudesse ser representado e tratado. Por outro lado, no âmbito agrícola, o uso de mecanização no preparo do solo intensificou o processo de erosão e juntamente aos sedimentos carregados somam-se os novos pesticidas e fertilizantes. Estes desafios geraram a necessidade de conhecimento de novas disciplinas como a geomorfologia, pedologia, biologia e química. A globalização introduziu também aspectos relativos às mudanças climáticas devido ao desmatamento, efeito estufa, criando a necessidade de interação de conhecimentos com a hidrometeorologia (TUCCI, 1998). E é por isso que Tucci (2000) afirma que a Hidrologia tem passado por uma grande ampliação interdisciplinar.

Tucci (2005) discorre sobre a evolução dos modelos hidrológicos considerando a existência de três fases: uma até 1940, outra de 1940 até metade da década de 1960 e daí em diante, uma terceira. Na primeira fase, a hidrologia consistia basicamente em estudos descritivos do ciclo hidrológico, raramente quantificando os processos envolvidos, de modo que a modelagem utilizava métodos muito simples. Na segunda fase, com a necessidade de acelerar o crescimento econômico, os recursos hídricos começaram a ser utilizados mais intensamente, necessitando-se quantificá-los, dando-se ênfase a componentes isolados do ciclo hidrológico, como: escoamento superficial, escoamento no canal, infiltração, evaporação, como os modelos de Puls (1949)/Escoamento em canal e o método da curva número - *Soil Conservation Service* (SCS) (1956). Na década de 60, com o advento da computação, diversos modelos passam a ser

propostos e colocados em uso por todo o mundo, a exemplo do Stanford Watershed Model/Crawford e Linsley (1966), que foi o primeiro modelo a interagir com os principais componentes do ciclo hidrológico (CUNHA, 2004).

Lou (2010) esclarece que, no final da década de 70, a modelagem hidrológica segue em duas direções: uma que buscava a redução da necessidade de parametrização e outra que abraçou a causa da problemática ambiental, concentrando-se na avaliação do impacto do uso/alteração/ocupação dos solos. Assim, nesta segunda corrente iniciou-se o desenvolvimento de modelos com maior base física, procurando relações que pudessem ser estabelecidas entre as características dos sistemas e seus parâmetros, buscando reduzir o empirismo das estimativas dos últimos. Isto significava ir além da equação da continuidade. Por exemplo, na simulação de vazões dos rios significava introduzir a equação de quantidade de movimento que representa o efeito das forças no escoamento.

A água pode ser vista como um aglutinador, ou melhor, como um tipo de espelho no qual tudo que se processa na abrangência de uma bacia hidrográfica está refletido. Daí que não há como se estabelecer um modelo hidrológico padrão, mas sim, elegê-lo a depender da disponibilidade de dados para alimentar parâmetros requeridos e a aplicação que se pretenda. A disponibilidade de dados históricos relacionados a parâmetros ambientais implica o desenvolvimento de pesquisas de campo e a aplicação de modelos matemáticos (BRITTO *et al.*, 2017).

A complexidade das características, processos e interações homem-natureza é um ponto que dificulta a modelagem, sendo necessário simplificar muitos dos processos envolvidos no fluxo da água em uma bacia hidrográfica. Assim, considera-se fundamental o conhecimento da fração de água disponível para utilização no interior da bacia do São Francisco, haja vista que se trata de um recurso limitado e essencial para o desenvolvimento de múltiplas atividades, como apontam Vasco *et al.* (2017) e Britto *et al.* (2018).

Outro fator relevante é que ao longo do curso principal, o rio São Francisco possui três grandes reservatórios de regularização instalados em série, que são responsáveis pelo controle do regime de suas vazões. Na região do Submédio do rio São Francisco, as usinas instaladas pela Companhia Hidrelétrica do São Francisco (CHESF) compreendem o maior complexo hidrelétrico no Brasil (potência total: 10.618 MW, volume acúmulo de $50 \times 10^9 \text{ m}^3$). Ainda, as construções das barragens tiveram grandes impactos no regime de vazões ao longo do rio São Francisco (VASCO *et al.*, 2017).

O uso racional da água se posiciona diante de atividades antrópicas diversas e por isso possui caráter interdisciplinar. O planejamento de recursos hídricos constitui um instrumento fundamental para o gerenciamento da água e da bacia hidrográfica, uma vez que pode induzir ou restringir o uso e ocupação do solo e a implantação de planos de desenvolvimento econômico em sua área de abrangência, pelo disciplinamento e controle do acesso e uso da água.

Percebe-se daí o reflexo de um fenômeno natural da estruturação socioeconômica: ao longo de sua evolução, o homem tornou-se a forma dominante de vida na Terra, impondo suas regras às demais espécies e desenvolvendo uma tecnologia que lhe permite alterar, de maneira cada vez mais rápida e poderosa, o ambiente em que vive. Em virtude do desenvolvimento obtido, o ser humano antes apenas um entre os vários organismos integrantes da biosfera, assumiu o papel de interventor da natureza, explorando exaustivamente os recursos naturais e deteriorando a qualidade do meio ambiente (BRITTO *et al.*, 2016; SANTANA *et al.*, 2018; ARAÚJO *et al.* 2018). Nesse sentido, gerenciar águas e bacias hidrográficas exige que se considerem diversos processos naturais e sociais interligados, com abordagem holística e sistêmica, visando compatibilizar o uso e ocupação do solo nas bacias hidrográficas com a garantia de disponibilidade de água para a sustentabilidade do desenvolvimento econômico, social e ambiental.

A partir da vertente legislativa no Brasil, vigora a lei federal nº 9.433 desde 1997, conhecida como Lei das Águas, que regulamentou o artigo 21 da Constituição Federal ao instituir a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e criar o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH), elegendo a gestão descentralizada e participativa dos recursos hídricos como seus principais fundamentos (BRASIL, 1997). Aguiar Netto *et al.* (2010) destaca a importância de se assinalar a realidade local, reiterando que a problemática ambiental do rio São Francisco e seus afluentes extrapola os limites dos Estados de Sergipe e Alagoas.

Assim, constata-se que a bacia hidrográfica é um modo de recorte espacial imprescindível para a realização de pesquisa científica, planejamento e gestão regional dos recursos hídricos e por isso a modelagem hidrológica pode apresentar bons resultados em todos os campos de aplicação a eles relacionados.

2.3. Modelos hidrológicos TANK MODEL e SWAT

Num modelo matemático que vise representar um sistema, toda a lógica de uma ou mais inter-relações será explicitada através de uma ou mais expressões matemáticas. Os avanços advindos das concepções da teoria de sistemas, conjuntamente com o advento da computação por

máquinas catalisaram grandes avanços no campo da modelagem matemática em diversos setores. Os modelos hidrológicos utilizados nos dias atuais representam sistemas complexos e trabalham com tamanho volume e diversidade de dados que torna difícil acreditar que os primeiros hidrologistas sequer sonhassem com tamanho poder preditivo e detalhamento de cenários.

Dooge (1973), que vivenciou o momento de efervescência daqueles primórdios da teoria de sistemas, esclarece que já existiam tantas definições de sistemas quanto se multiplicavam os livros sobre o assunto de análise e síntese de sistemas. Após ter considerado um grande número de definições do que poderia vir a ser um sistema, criou sua própria definição na qual afirma que "um sistema é qualquer estrutura, dispositivo, esquema ou procedimento, real ou abstrato, que se inter-relaciona em um determinado momento" (DOOGE, 1973.p.4). Sua ênfase está na função do sistema que inter-relaciona uma entrada e uma saída num dado instante.

Dentre as características que Dooge (1973) descreve para os sistemas, uma é o seu estado, o qual considera um conceito muito geral. Uma alteração em qualquer variável do sistema é suficiente para reproduzir uma mudança de estado. Se todas as variáveis de estado forem completamente conhecidas, o estado do sistema é conhecido. Ele exemplifica isto em termos hidrológicos como sendo o mesmo que dizer que se pudesse saber exatamente onde está toda a água de uma bacia hidrográfica - quanto dela na superfície, quanto em cada horizonte de solo e quanto em cada canal - a cada momento, conhecer-se-ia assim o estado hidrológico da bacia hidrográfica ou o estado do sistema bacia hidrográfica.

Outra característica muito importante dos sistemas é a memória do sistema, que é o período de tempo no passado sobre o qual a entrada afeta o estado atual. Se um sistema tiver uma memória zero, seu estado e sua saída dependerão apenas da entrada atual. Se tiver uma memória infinita, o estado e a saída dependerão de todo o histórico passado do sistema. Em um sistema com uma memória finita, seu comportamento, seu estado e sua saída dependem apenas do histórico do sistema por um período de tempo anterior igual à memória. (DOOGE, 1973).

Outra distinção importante é entre sistemas variantes no tempo e invariantes no tempo. Um sistema invariante no tempo é aquele cujo relacionamento de entrada-saída não depende do tempo em que a entrada é aplicada. Na prática, os sistemas hidrológicos são variantes no tempo, pois ocorrem variações sazonais ao longo do ano e até mesmo ao longo do dia, a exemplo da variação da atividade solar. No entanto, as vantagens de se assumir que os sistemas são

invariantes no tempo, são tais que essas variações reais podem ser, de certo modo, negligenciadas. (idem).

É necessário distinguir entre sistemas contínuos e discretos. Mas antes é importante falar que quando uma entrada ou uma saída de um sistema é contínua significa que os seus valores são conhecidos continuamente, ou seja, podem ser amostrados a qualquer frequência, sempre se obtendo valores distintos, virtualmente contínuos, a cada leitura. Neste caso, em especial, pode-se exemplificar com os dados de precipitação diários como não contínuos, enquanto os dados de vazão (de rios perenes) como contínuos. Diz-se que uma entrada ou uma saída é discreta se o valor for apenas conhecido ou só puder ser amostrado em intervalos de tempo finitos, um exemplo associado à hidrologia é a textura dos solos.

Diz-se que uma entrada ou uma saída é quantizada quando o valor só muda em certos intervalos discretos de tempo e mantém um valor constante entre esses intervalos. Este é um tipo interessante de dados, e um bom exemplo é a temperatura basal de um mamífero, mas registros de precipitação ou de vazão, quando conhecidos apenas em termos médios, representativos de período, a exemplo das médias mensais e anuais históricas. Diz-se que um sistema é discreto quando muda de estado em intervalos discretos de tempo, sendo que para este caso, servem os exemplos binários, e o que se tem mais próximo na natureza seriam dados de tipos tais como dia ou noite, choveu ou não choveu.

Para refletir sobre a questão de se um determinado modelo hidrológico é contínuo ou discreto, deve-se ter em mente que a sua abstração matemática nada tem a ver com as limitações para a coleta e registro de dados acerca das variáveis ambientais requeridas e nem com as limitações impostas por alguma implementação computadorizada. Reconhecidamente, o registro de variáveis ambientais se dá em passo de tempo discreto. Também é fato que o modo de processamento dos computadores existentes é de tempo discreto, dada sua tecnologia necessitar de um *clock* para coordenação do funcionamento do seu processador, além de seu núcleo e memórias trabalharem somente com o tipo de dados binários, ou discretos. Estas limitações fazem com que os modelos hidrológicos sejam executados em intervalos discretos de tempo, de fato. O que, contudo, não é o mesmo que afirmar que não sejam contínuos ou que não suportem ser processados em "passo" de tempo contínuo.

Com isso, pode-se avançar ainda com Dooge (1973), para falar das variáveis de entrada e saída e também dos parâmetros do sistema como sendo concentrados ou distribuídos. Uma

variável ou parâmetro concentrado é aquele cuja variação no espaço é inexistente ou foi ignorada. Assim, a precipitação média sobre toda extensão da bacia hidrográfica usada como entrada em muitos estudos hidrológicos é um insumo concentrado. Quando a variação em uma ou mais dimensões espaciais é levada em conta, o parâmetro é distribuído. Os parâmetros de um sistema em si ou as entradas ou saídas podem ser concentrados. O comportamento de sistemas concentrados é governado por equações diferenciais ordinárias com o tempo. Já o comportamento de sistemas distribuídos é governado por equações diferenciais parciais.

A distinção entre linear e não linear é de vital importância na teoria dos sistemas, assim como na mecânica clássica, pois implica na escolha de modelos matemáticos adequados. A análise e síntese de sistemas lineares podem se basear sobre o amplo acervo da matemática linear. Por outro lado, os sistemas não lineares evoluíram bastante desde o tempo da publicação de Dooge (1973), além de apresentarem a vantagem da continuidade de sua(s) saída(s), uma vez que possuem memória de estado do sistema maior que zero. Uma das propriedades especiais dos sistemas lineares é aquela da superposição a qual um sistema não linear não pode dispor. (idem).

Por fim, aproveitando-se das ótimas descrições de Dooge (1973), tem-se que falar de mais uma característica importante dos sistemas que trata da distinção entre sistemas determinísticos e probabilísticos que assim como no tema recém abordado, dão origem a duas correntes de modelagem matemática. Em um sistema determinístico, a mesma entrada sempre produzirá a mesma saída. A entrada para um sistema determinístico pode ser ela mesma, determinística ou estocástica. Já um sistema probabilístico (estocástico) é aquele que contém um ou mais elementos nos quais a relação entre entrada e saída é estatística, onde a saída, a cada passo de tempo, irá depender de seus próprios valores nos passos de tempo precedentes.

O que, no conjunto, remete à compreensão de que modelos determinísticos podem ter memória de estado igual à zero ou maior que zero, enquanto no caso dos modelos estocásticos ocorre uma memória de estado maior que zero implícita à sua própria formulação estatística. Assim, modelos determinísticos são deveras importantes no campo da montagem de cenários futuros enquanto os modelos estocásticos o são no campo das predições.

Vogel (1999) afirma que, quando se atua ou estuda-se na área de previsão de vazão, é perceptível a existência de duas escolas bem distintas: a estocástica e a determinística sendo raro encontrar um engenheiro que tenha uma visão balanceada do mundo e que simultaneamente veja

os elementos estocásticos e determinísticos na hora de modelar um problema. Atribuindo-se esta diferença ao sistema educacional (CARVALHO, 2001).

Segundo CARVALHO (2001), o assunto é de fundamental importância para o Setor Elétrico Brasileiro (SEB) porque todos os modelos adotados para planejamento do Sistema Interligado Nacional (SIN) partem do pressuposto de que o processo estocástico seja subjacente às séries de afluições aos aproveitamentos, já que estas são tidas por apresentarem comportamento estacionário. Caso contrário, os cenários futuros devem ser elaborados por alguma outra metodologia, diferente da empregada nos modelos atualmente em uso no SEB. Deste modo, é possível acreditar que apesar das diferenças entre as duas principais correntes da modelagem hidrológica, a melhor solução para os problemas enfrentados na bacia hidrográfica do rio São Francisco seja a congregação dos saberes.

Mas ainda em relação aos modelos matemáticos, eles podem ser divididos em empíricos, nos quais as equações de transformação de estados são empíricas e em conceituais, quando estas transformações são conceituais, por exemplo, modelos que utilizam equações da continuidade e da quantidade do movimento. Segundo Stanescu e Musy (2006), os modelos hidrológicos conceituais podem ser do tipo reservatório (ou armazenamento) ou do tipo escoamento superficial. Os modelos do tipo reservatório partem da premissa de que a parte terrestre do ciclo hidrológico comporta-se como um sistema de reservatórios que reproduzem, na vertical, os diferentes níveis de armazenamento de água. Estes reservatórios controlam a água armazenada de modo análogo às leis da física que definem os comportamentos hidrológicos dos horizontes dos solos e as teorias de hidrodinâmica em meios porosos.

2.3.1. O modelo TANK MODEL

O modelo Tank Model foi desenvolvido por Sugawara, em 1961 (SUGAWARA *et al.*, 1984; SUGAWARA, 1995; OLIVEIRA, 1999). É considerado um modelo do tipo reservatório, determinístico, contínuo, não linear, concentrado e conceitual. Sugawara (1995) apresenta uma configuração semi distribuída do modelo. Em Vasconcellos (2017), o Tank Model foi desenvolvido num nível de distribuição em células de 2x2m. Modelos conceituais, como o Tank Model, operam com armazenamentos diferentes e mutuamente inter-relacionados, representando os elementos físicos em uma área de captação. Em um modelo concentrado, todos os parâmetros e variáveis representam valores médios de toda a área de captação. As equações são semi-empíricas, já que tomam por base a analogia a conceitos físicos.

Para Kim *et al.* (2001), o Tank Model, dentre vários modelos determinísticos de chuva-vazão, é escolhido frequentemente pela sua simplicidade. A preferência na prática é em razão de requerer somente dados de precipitação, vazão e evapotranspiração. Por outro lado, o modelo requer muito tempo e esforço para obter bons resultados em virtude da calibração dos seus parâmetros (LINDNER, 2007). Sittner (1976) esclarece que as formulações matemáticas que definem o fluxo da água de reservatório para reservatório no Tank Model assemelham-se aos conceitos clássicos da hidrologia de interceptação, infiltração, percolação, armazenamento do aquífero. Os parâmetros do modelo Tank Model, usualmente, não podem ser estimados de dados de campo, mas devem ser obtidos por meio de calibração (JUNSAWANG *et al.*, 2007).

Dentre os modelos hidrológicos existentes, destacam-se os do tipo chuva-vazão que servem como um excelente meio para obtenção de séries fluviométricas a partir dos dados de chuva (SILVA, 1993). Este tipo de modelo é considerado bastante simples, devido necessitar basicamente dos dados de chuva como entrada, mas esta simplicidade não significa que tais modelos sejam rudimentares, pelo contrário, podem requerer muita sofisticação matemática, como se observa em casos como os dos modelos Estocásticos e dos fundamentados na técnica das Redes Neurais. A simplicidade também não pode ser interpretada como limitação, como no prodigioso exemplo que é o modelo de reservatório Tank Model, como visto nos trabalhos de Lindner e Kobiyama (2009), Vasconcellos (2017) e Vasconcellos *et al.* (2018), onde o comportamento subterrâneo das águas é muito bem explicado e aplicável pragmaticamente na formalização e aplicação de índices, um para discriminação dos períodos úmidos e secos, o TMI, e outro para estimativa da umidade do solo, o IUS.

Sugawara (1995) descreve o modelo Tank Model, iniciando pela explicação de que é composto por quatro reservatórios definidos verticalmente em série, para o caso de entradas em passo de tempo diário. O primeiro reservatório (o mais acima) se apresenta aberto na parte superior, voltada para a atmosfera, por onde se dá as entradas e saídas das precipitações e evapotranspiração, respectivamente. Em relação às suas saídas, os reservatórios as transmitem através de orifícios laterais que representam as vazões e de fundo que representam a drenagem (infiltração) para o reservatório subsequente (mais abaixo). As alturas e diâmetros dos orifícios podem ser ajustados a fim de adequarem as suas saídas, ou seja, a calibração. O produto entre um coeficiente de conversão e a somatória das saídas laterais resultam nas vazões em $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ em diferentes escalas de tempo, conforme o coeficiente de conversão utilizado.

Em relação às correlações com os fluxos estabelecidos pelas ciências dos solos, Sugawara (1995) diz que a(s) saída(s) do tanque superior é (são) considerada(s) como o escoamento(s) superficial (e sub-superficial), a saída a partir do segundo tanque é o escoamento lateral, a partir do terceiro tanque tem-se o escoamento de sub-base e na saída do quarto tanque o escoamento de base. O que corresponde com a estrutura zonal de água subterrânea ilustrada na figura 3.11.

Figura 2.1 – Modelo Tank Model

PRECIPITAÇÃO



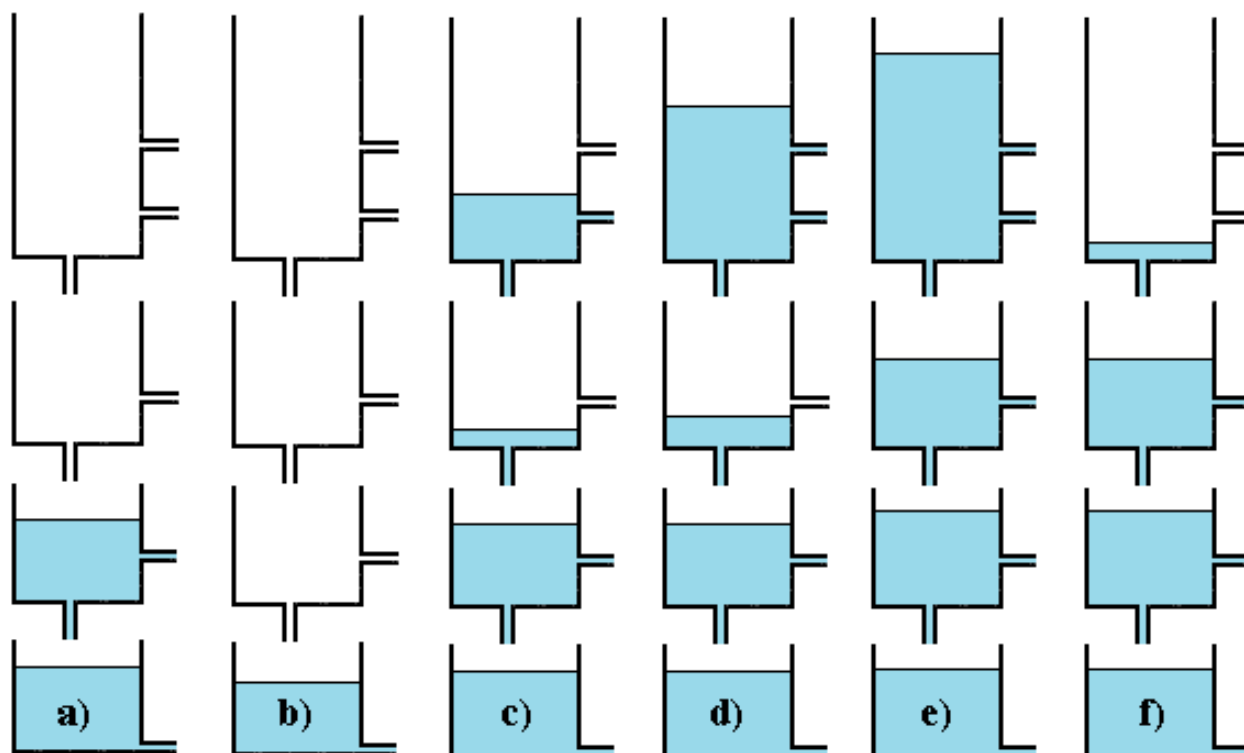
Fonte: Sugawara (1995).

Em relação à evapotranspiração (ETR), explica Sugawara (1995), a precipitação entra pela parte superior do tanque sendo debitada da ETR. Nos casos de estiagem a ETR será subtraída do armazenamento do primeiro tanque. Se não houver água no primeiro tanque, a ETR é subtraída a partir do segundo tanque. Se não houver água no segundo tanque, a ETR é subtraída do terceiro tanque; e assim por diante.

Vasconcellos (2017, pp.24), descreve o modelo do seguinte modo: "o Tank Model simula o balanço hídrico de uma bacia hidrográfica geralmente utilizando um conjunto de quatro tanques, ou reservatórios, em série vertical, onde o armazenamento do primeiro tanque é determinado pela precipitação e o armazenamento dos demais tanques é determinado pela infiltração do tanque superior".

Apesar de sua perspectiva simples, o comportamento do modelo tanque não é trivial. Se não houver nenhuma precipitação durante muito tempo, a parte superior e o segundo tanque irão esvaziar e o modelo tanque vai ficar como se pode ver na figura 3.12a ou 3.12b. Sob tais condições, o escoamento é estável. No caso da figura 3.12a a descarga vai diminuir muito lentamente, e, no caso da figura, 3.12b a descarga será quase constante.

Figura 2.2 – Dinâmicas da água no ModeloTank Model

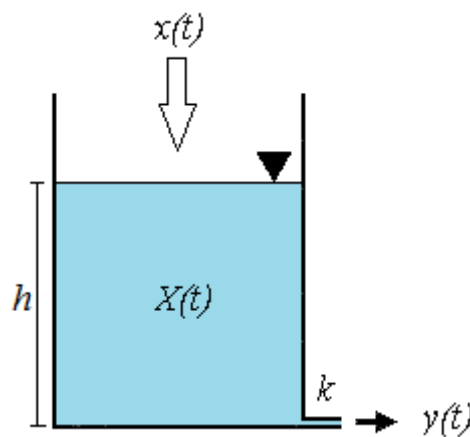


Fonte: Sugawara (1995, Modificado).

Se houver uma chuva pesada de relativamente curta duração sob estas condições, o modelo de tanque irá mover-se para um dos estados mostrado nas figuras 3.12c e 3.12d. Nestes casos, uma descarga alta e de curta duração irá ocorrer antes de o modelo retornar a estabilidade anterior. Nesses exemplos dados, de altas descargas, a maior parte da vazão advém do escoamento superficial, ou seja, do tanque de topo e existe pouco ou nenhum escoamento do segundo tanque. E se ocorrer uma precipitação pesada ao longo de um período mais longo, em seguida o modelo tanque assumirá o estado mostrado na figura 3.12e. Quando a chuva para, a água no tanque superior irá correr rapidamente e o modelo tanque vai passar para o estado mostrado na figura 3.12f. Em seguida, a saída a partir do segundo tanque irá diminuir lentamente, formando uma hidrografia com a típica inclinação para baixo que segue a um pico de vazão.

O modelo Tank Model pode representar muitos tipos de hidrografia devido à sua estrutura não linear, advinda do posicionamento das saídas laterais um tanto acima do fundo de cada tanque o que, segundo Sugawara (1995), faz com que perda inicial de precipitação não precise ser considerada. Para explicar o funcionamento do modelo Tank Model, Sugawara (1995) utiliza-se de um modelo simplificado, contando com um único tanque somente, sem drenagem de fundo, com a altura de sua única saída lateral igual a zero. Tal estrutura pode ser visualizada na figura 3.13.

Figura 2.3 – Modelo tanque linear simples



Fonte: Sugawara (1995)

Se $X(t)$ é o armazenamento no tanque, $x(t)$ a entrada e $y(t)$ a saída, então as seguintes equações podem ser usadas:

$$\frac{d}{dt} X(t) = x(t) - y(t), \quad y(t) = k X(t) \quad (1)$$

Por tanto:

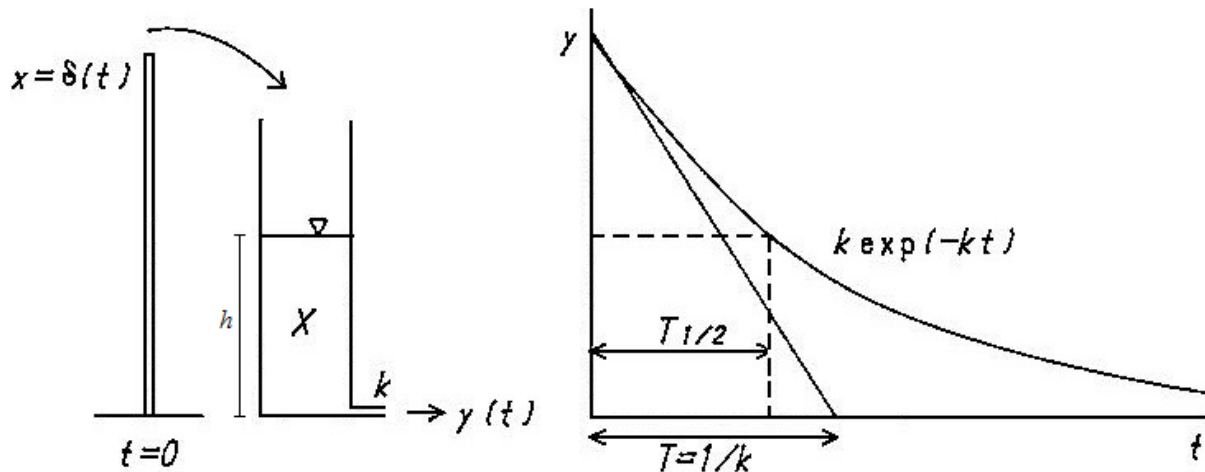
$$\frac{d}{dt} X(t) + k X(t) = x(t), \quad (2)$$

$$\left(\frac{d}{dt} + k \right) X(t) = x(t), \quad \left(\frac{d}{dt} + k \right) y(t) = k x(t). \quad (3)$$

Se a entrada no instante $t = 0$ para um tanque linear vazio é a função δ , isto é, $X = \delta(t)$, então a saída será a função exponencial $y(t) = k \exp(-kt)$, como mostrado na Figura 3.14. Se desenhar uma tangente a esta curva exponencial em $t = 0$, então ele irá cortar o eixo horizontal

(eixo t) em $T = 1 / k$, que é a constante de tempo para um tanque linear simples do operador $k/(D+k)$, onde D diferencial $D = d/dt$.

Figura 2.4 – Determinação do tempo de secagem de um tanque linear simples



Fonte: Sugawara (1995) - Adaptado

O significado disto é o seguinte: se a saída $y(t)$ é mantida na sua vazão inicial, ou seja, igual ao seu valor em $t = 0$, então o armazenamento X no tanque irá desaparecer após um determinado tempo $T=1/k$. Mas na realidade, a saída diminui à medida que o armazenamento X diminui, devido ao rebaixamento da altura h da coluna d'água com tempo, o que aumenta a duração do escoamento. Tais estudos conseguiram demonstrar a origem do comportamento de não linear do modelo e a altura h do armazenamento X dos reservatórios, a sua memória. Sugawara (1995) sugere o cálculo do período de meia, $T_{1/2}$, como um número bastante conveniente e mais prático de ser calculado e que representa o momento em que tanto o armazenamento quanto a velocidade de descarga diminuem à metade do seu valor original. O que é dado por:

$$T_{1/2} = T \ln 2 = 0,6931 T = 0.7 T \quad (4)$$

Foi, ao se considerar a constante de tempo para cada tanque do modelo de quatro tanques, movendo-se as alturas das saídas laterais (saídas) para o nível inferior, que Sugawara (1995) concluiu que o tanque de topo deve ter uma constante de tempo de cerca de um dia ou alguns dias, o segundo tanque de uma semana a ± 10 dias, o terceiro tanque de alguns meses ou mais tempo e o quarto tanque deve ter uma constante de tempo de anos. A grosso modo, as constantes de tempo de topo, do segundo e do terceiro tanques devem ter uma proporção de $1: 5: 5^2$ ou mais. As constantes de tempo também se tornarão maiores conforme a zona de captação se tornar maior e será proporcional à raiz quadrada da zona de captação, isto é, a área da bacia.

Em relação escoamento de enchentes, tem-se uma fórmula aproximada onde a unidade de tempo da inundação, T_U (horas), é dada por:

$$T_U = C \cdot A^{0,5} \quad (5)$$

Onde, C é um coeficiente que pode ser estimado a partir do tempo de concentração da bacia e A é a área da bacia hidrográfica em Km^2

Sugawara (1995) explica que para análise de inundação, a unidade de tempo T_U deve ser de cerca de um terço da constante de tempo T , ou seja: $T_U = T / 3$. Usando esta fórmula para uma bacia de 10 km^2 seria necessária uma coleta de dados de precipitação e descarga a intervalos de 10 minutos para um monitoramento de enchentes. Já em uma bacia de 100 km^2 seriam necessárias coletas de dados a cada meia hora, no mínimo.

O coeficiente C encontrado por Sugawara para a T_U é de 0,15, porque foi obtida principalmente a partir de exemplos de bacias japonesas, onde as áreas de captação são pequenas e a inclinação da superfície do solo é relativamente elevada. Para grandes bacias, ele sugere valores de 0,2 a 0,3, ou até maiores. Na China, Sugawara encontrou para o rio Yangtze, cuja área de captação de sua bacia é de cerca de meio milhão de quilômetros quadrados, um $C = 0,34$, por exemplo.

Sugawara (1995) esclarece as possibilidades de configuração do modelo Tank Model para muitas situações, uma que é bastante interessante é aquela que serve para aplicações em regiões semi-áridas e desérticas onde a evapotranspiração potencial (ETP) anual é maior do que a precipitação anual. As áreas mais elevadas e montanhosas tornar-se-ão secas na estação seca, pois as águas subterrâneas são drenadas pela gravidade com o tempo. Por outro lado, áreas baixas ao longo de rios permanecem úmidas porque recebem contribuições das águas subterrâneas das áreas mais altas. Quando chega a estação chuvosa, o escoamento superficial ocorre inicialmente a partir das áreas ao longo do rio, porque elas ainda estão úmidas. Em áreas montanhosas secas, no entanto, a água da chuva é absorvida primeiramente, devido à falta de umidade do solo e não há escoamento superficial tão rapidamente.

Durante a estação chuvosa a percentagem de área molhada aumenta com o tempo, e assim o escoamento superficial também aumentará proporcionalmente. Pelo contrário, durante a estação seca, a porcentagem de área seca aumenta com o tempo e a da área passível de escoamento diminui. Como praticamente não ocorre evapotranspiração a partir de áreas secas, a evapotranspiração real (ETR) da bacia é menor do que a ETP. Portanto, mesmo em a ETP

anual sendo maior do que a precipitação anual, existe a possibilidade de escoamento devido à existência de um percentual de áreas ainda com solos úmidos. (SUGAWARA, 1995). Para estes casos, o autor apresenta um exemplo de modelo Tank Model semi-distribuído funcional.

2.3.2. O modelo SWAT

O modelo SWAT foi elaborado por Dr. Jeff Arnold do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (*USDA - United States Department of Agriculture*), do Setor de Pesquisas Agrícolas (*Agricultural Research Service - ARS*) (ARNOLD *et al.*, 1998). Ele foi desenvolvido para prever os impactos das práticas de manejo do solo sobre os recursos hídricos, produção de sedimentos e agroquímicos em grandes bacias hidrográficas por períodos variáveis de tempo (NEITSCH *et al.*, 2011). Assim, é um modelo considerado contínuo, permitindo simular espacialmente uma bacia hidrográfica como mosaico complexo com diferentes usos e coberturas do solo, declividades e tipos de solo (LOPES e KOBAYAMA, 2008), é considerado também como um modelo conceitual, semi distribuído, determinístico, sendo do tipo escoamento superficial.

O SWAT é o resultado de mais de 30 anos em experiências de modelagem hidrológica desenvolvidas pelo USDA. O SWAT é o descendente direto do *Simulator of Water Resources in Rural Basins* (SWRRB) (ARNOLD & WILLIAMS, 1995), que por sua vez foi desenvolvido tendo como base três outros modelos: o modelo *Chemical, Run off na Erosion from Agricultural Management Systems* (CREAMS) (KNISEL, 1980), *Ground water Loading Effects on Agricultural Management Systems* (GLEAMS) (LEONARD *et al.*, 1987) e o *Erosion Productivity Impact Calculator* (EPIC) (WILLIAMS, 1990). No início da década de 90, foi adicionado ao SWRRB o modelo de propagação de vazões *Routing Outputs to Outlet* (ROTO) (ARNOLD *et al.*, 1995), dando origem à primeira versão do SWAT. Por estar em boa parte, fundamentado no conjunto de equações que descrevem os fenômenos com ênfase nas interações e fenômenos físicos, é considerado um modelo de base física.

Conforme Dhar (2009), citado por Andrade (2011), em sua estrutura, o modelo SWAT incorpora oito componentes principais para prover suas simulações: um componente hidrológico que trata do escoamento superficial, percolação, fluxo lateral, fluxo subterrâneo, evapotranspiração, neve e o fluxo da rede de drenagem, incluindo ainda a análise de reservatórios. Um componente para tratar do aporte de sedimentos abrange o ciclo hidrossedimentológico que utiliza a Equação Universal de Perda do Solo Modificada (EUPS-M).

Já o componente clima trata da precipitação, umidade relativa do ar, velocidade do vento, radiação solar e a temperatura do ar. O componente "temperatura do solo" simula diariamente uma temperatura média no centro de cada camada do solo com objetivo do uso nos processos hidrológicos e no declínio de resíduos orgânicos. Um componente específico cuida do crescimento vegetal, enquanto outro trata da relação entre os nutrientes, investiga os compostos minerais e orgânicos do nitrogênio e do fósforo (ANDRADE, 2011).

Um componente muito importante trata do tema relacionado aos pesticidas e bactérias, descrevendo a movimentação de tais elementos, analisando a biodegradação e transformação dos pesticidas, além do declínio de bactérias. O modelo pode ainda acompanhar a existência de metais pesados, contudo sem analisar possíveis transformações. O oitavo e último componente aborda as práticas agrícolas, analisando desde o cultivo ao crescimento das culturas, considerando ainda a irrigação e o manejo de resíduos na terra (ANDRADE, 2011).

O modelo SWAT é mundialmente utilizado para modelagem acadêmico-científica. No Brasil, podem-se citar pesquisas como: Adriolo *et al.* (2008), Bittencourt e Gobbi (2006), Blainski, Silveira e Conceição (2008), Lelis e Calijuri(2010), Lino *et al.* (2009), Souza *et al.* (2009) e Silva(2013). Além de estarem disponíveis suítes de modelagem gratuitas no site da Universidade A&M do Texas (TAMU), nos Estados Unidos.

É imprescindível considerar aqui a importância de tais suítes, devido ao fato de estarem implementadas para os principais softwares de geoprocessamento existentes, como o ArcGis®, Quantum GIS, Map Window e GRASS. Tal integração a um sistema de informação geográfica (SIG), além de facilitar imensamente o trabalho de criação da complexa estrutura de dados requerida pelo modelo SWAT, traz segurança e qualidade à mesma. Por outro lado, tais suítes permitem que os modeladores tenham à disposição opções para implementação a partir de SIGs proprietários como também daqueles gratuitos e de código aberto.

2.4. Modelagem hidrológica na bacia hidrográfica do rio São Francisco

A escolha de um modelo hidrológico em detrimento de outro dependerá da aplicação que se fará com seus resultados. Um exemplo bastante claro disto pode ser visto ao se estudar a bacia hidrográfica do rio São Francisco. A cada estudo de modelagem encontrado para a região, tem-se observado que diferentes modelos são utilizados. Isto ocorre porque, além da grande diversidade de usos que precisam ser atendidos, também porque a bacia é muito extensa, acarretando uma diversidade de comportamentos, tanto das variáveis naturais quanto das variáveis sócio-

econômicas, de uma região para outra, que precisam ser melhor ou na maioria das vezes, mais rapidamente compreendidos.

Para compreender o tamanho do desafio em se modelar sistemas complexos pode-se citar Carvalho (2015), que realizou pesquisas de acoplamento entre os modelos (ED2+BRAMS+MGB) constatou coerência entre a explicação obtida relativa a não estacionariedade observada na bacia do Paraná e conclui que é preciso haver uma reflexão do SEB quanto à pertinência de continuar usando modelos que dependem dessa hipótese. Naturalmente, não se propõe qualquer mudança abrupta, até porque não estão disponíveis para uso operativo modelos que prescindam da hipótese de estacionariedade. Mendes (2012) comenta que nem na realidade prática e nem na maioria das pesquisas e trabalhos acadêmicos na área de operação de sistemas de reservatórios é tratada a ideia do uso múltiplo das águas de forma adequada. Sua Tese tratou justamente desta questão, onde propõe uma modificação no modelo que, segundo o autor, permitirá sua otimização não somente considerando o máximo retorno econômico, mas também um fator relativo às garantias de manutenção dos múltiplos usos das águas do rio São Francisco.

Assim, a utilização de modelos é feita na busca de um melhor delineamento das inter-relações entre variáveis e entre as diferentes regiões da bacia do São Francisco que conta, dentre os usos feitos das águas, com o setor hidroelétrico como um fator de grande interferência. A calha principal do rio é marcada pela presença de grandes barragens, tanto com fins de geração de energia quanto com fins de regulação da vazão. Ocorre que o sistema elétrico nacional é interligado e assim variações nas barragens do São Francisco repercutem na operação das barragens de outras bacias hidrográficas pelo país afora e vice-versa. Onde Vasco *et al.* (2017), Santana *et al.* (2018) e Britto *et al.* (2018) apontam que a regularização do rio São Francisco está associada a impactos sobre o comportamento hidrológico com significativas alterações na qualidade e quantidade da água.

Os problemas ambientais que atingem a bacia hidrográfica do baixo São Francisco, por conta da regularização da vazão, reduziram os sedimentos em suspensão e, portanto, os nutrientes que serviam de alimentos para a fauna e flora, secaram as lagoas marginais, permitiram o assoreamento da calha e erosão das margens, degradaram a foz, alteraram o curso, recuaram a linha de costa, esgotaram os recursos pesqueiros, aumentaram o alcance e a duração do avanço da cunha salina marítima (ARAÚJO *et al.* 2016; SANTANA *et al.* 2018).

As barragens alteraram o regime das águas do rio e do mar, por consequência, inundaram e fizeram desaparecer o Povoado Cabeço em Brejo Grande/SE, modificando a geomorfologia da foz do rio (SOUZA; NEUMANN LEITÃO, 2000; OLIVEIRA *et al.*, 2003; HOLANDA *et al.*, 2009; MEDEIROS *et al.*, 2007; AGUIAR NETTO *et al.*, 2011; FONTES, 2008; FONTES *et al.*, 2009).

As barragens construídas para geração de hidroeletricidade na bacia hidrográfica do rio São Francisco alteraram os fluxos do rio e criaram obstáculos que impedem o ciclo migratório (piracema). Conforme abordagem de Medeiros *et al.* (2007), em relação aos impactos sofridos pelo rio São Francisco, conclui que as várias barragens em cascatas, construídas desde a década de 1970 provocaram enormes modificações nas vazões interanuais e na pulsação natural do médio e baixo São Francisco, sendo que isto reduz a velocidade da corrente e a quantidade dos sedimentos transportados, o que desenvolve uma biota lântica na barragem, promovendo a perda de espécies e solos agrícolas, além do empobrecimento da fauna.

Acerca desse tema, os impactos causados pelas barragens são um assunto de preocupação internacional (VOROSMARTY *et al.*, 1997; SYVITSKI *et al.*, 2005) e preocupação nacional (TUNDISI *et al.*, 2014; MEDEIROS *et al.*, 2010). Uma das modificações provocadas pela construção de barragens é a alteração no padrão de fluxo natural, que afeta vários processos biogeoquímicos. A implantação e operação de reservatórios são ações antrópicas que modificam as distribuições, espacial e temporal, das vazões naturais. Estudos realizados por Yan *et al.* (2010) avaliaram efeitos das barragens sobre o fluxo a jusante do rio Amarelo, na China. Seus resultados mostram que o volume de fluxo foi reduzido, e o fluxo de pico no hidrograma anual foi deslocado após as operações de grandes barragens no rio.

A ONS emprega os modelos NEWAVE e DECOMP para gerenciamento dos reservatórios com o objetivo de minimizar os custos de geração térmica. Da análise feita num estudo específico para a bacia do rio São Francisco, chegou-se à conclusão de que estes modelos não atendem satisfatoriamente a operação de uso múltiplo, devido à sua abordagem conceitual. Pois suas regras de otimização são sempre ótimas do ponto de vista energético, mas dadas às técnicas de agregação e desagregação dos reservatórios utilizados, trazem sérios problemas para a determinação da operação do sistema de modo favorável ao uso múltiplo da água. Questões importantes como operação com uso múltiplo com critérios de racionamento de água, regras para levar em conta a distribuição espacial e temporal de usos como irrigação, etc. não podem ser tratadas adequadamente com esses modelos (MENDES, 2012).

No caso da bacia hidrográfica do rio do São Francisco, observam-se muitos exemplos de modelagens realizados com os mais diversos modelos, ou mesmo, com as mais diferentes combinações de acoplamentos destes. Torres (2012) estuda os efeitos de regimes alternativos de precipitação na disponibilidade de recursos hídricos para irrigação explicitamente considerados no modelo hidrológico Mike Basin, assim como as reações dos produtores rurais a mudanças nos preços agrícolas e no acesso a recursos hídricos que são medidas com um modelo econômico baseado em programação não-linear. Ambos os modelos são externamente conectados, e os resultados mostram que a regulação no uso e na disponibilidade de recursos hídricos pode ser otimizada, a depender de fatores exógenos, tais como os preços das culturas e regimes de precipitação.

Ferreira (2011), trabalhando com um modelo completo de balanço e transporte de água (MBA/MTA) usando dados climatológicos e levando em conta a presença das represas na rede hidrográfica, reproduziu o regime de vazão apresentado pelos rios da bacia do São Francisco. Ele concluiu que a equação utilizada para simular represas demonstrou ser eficaz para tal, mas ajustes deveriam ser feitos para melhorar os resultados.

Silva (2007) ajustou o modelo hidrológico distribuído MGB-IPH da bacia do rio São Francisco às previsões de precipitação do modelo ETA, operado pelo Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos - CPTEC, que foram utilizadas como entrada no modelo hidrológico. O autor também concluiu que o desenvolvimento do trabalho permitiu ampliar o conhecimento dos processos meteorológicos e hidrológicos na bacia do rio São Francisco, podendo contribuir para o melhor gerenciamento dos sistemas hidrelétricos da bacia.

Em relação ao modelo SWAT, Gassman *et al.* (2007) destacam que vem sendo utilizado de forma contínua após o seu desenvolvimento. Muitas aplicações foram exercidas por agências e órgãos governamentais, principalmente na Europa e nos Estados Unidos, com o intuito de avaliar mudanças climáticas, efeitos do uso do solo sobre os recursos hídricos e averiguar a capacidade do modelo para aplicações futuras. Em seu trabalho sobre o uso do modelo SWAT no Brasil, Bressiani *et al.* (2015) encontrou para a bacia hidrográfica do rio São Francisco uma publicação de autoria de Creech *et al.* (2015). O modelo foi também implementado para a bacia inteira por Fernandes (2015), para o sub-médio por Silva (2015) e nos trabalhos para a elaboração do plano decenal da bacia para o período de 2016 a 2025 (CBHSF(b), 2016 pp.121).

A utilização do SWAT pode estar atrelada a vários propósitos segundo os objetivos de cada trabalho desenvolvido com essa ferramenta. Partindo de estudos em outras bacias

hidrográficas, podemos perceber que uns visam avaliar o comportamento hidrológico (MORIASI *et al.*, 2007; ABBASPOUR *et al.*, 2007 e SOUZA *et al.*, 2009), outros procuram quantificar a produção de sedimentos, embasados em diferentes formas de uso e manejo do solo (LOPES, 2008; LINO, 2009), além de poder ser utilizado para avaliar a propagação de nutrientes, pesticidas e contaminantes (PAPPAGALLO *et al.*, 2003; BAFFAUT *et al.*, 2003; MINELLA *et al.*, 2008).

Em relação ao modelo Tank, Lindner e Kobiyama (2009) propuseram um índice de umidade da bacia, o *Tank Moisture Index* (TMI), a partir do modelo Tank Model. Os autores desenvolveram este índice para previsão de eventos hidrológicos extremos, como inundações e seca, a partir da condição hídrica do solo. Vasconcellos *et al.* (2018) implementaram um modelo Tank, adotando o TMI e a técnica do problema inverso, na bacia do rio São Francisco, na qual o local da UHE Xingó foi considerado o exutório. O resultado da simulação demonstrou a criação satisfatória da precipitação média da bacia e a aplicação do TMI mostrou bom desempenho na indicação da ocorrência de seca ou estiagem por meio da comparação com os registros de Situação de Emergência e Estado de Calamidade Pública ocasionados por seca ou estiagem no município de Piranhas/AL. Isso indica que o TMI pode ser uma boa ferramenta para tomada de decisões na gestão de bacia do rio São Francisco.

Conforme Shuin *et al.* (2014), no Japão, o Tank Model com a estrutura de três reservatórios é aplicado ao sistema de evacuações em caso de deslizamentos. A partir de dois índices: o índice de água no solo (Soil Water Index – SWI), e o índice de áreas com potencial de escorregamento (Potential Landslide Area Index - PLAI) para avaliar a influência de tempestades em escorregamentos. Hong *et al.* (2016) e Aquili *et al.* (2016), propuseram modificações no Tank Model para simular as flutuações no nível de águas subterrâneas.

Vasconcellos (2018), explica que a umidade do solo pode ser um fator determinante nos processos hidrológicos. No entanto, o monitoramento do conteúdo de água no solo é difícil de ser realizado, devido à sua variabilidade espaço-temporal e porque as medições de campo são dispendiosas e demoradas. Assim, a utilização do Tank Model e também de um índice de umidade, derivado deste modelo, podem ser muito úteis nos estudos hidrológicos. A autora desenvolveu seu estudo para proposição de tal índice poder ser de forma distribuída na bacia hidrográfica, de modo a permitir uma análise detalhada do conteúdo de água do solo, considerando a sua variabilidade espacial.

Creech *et al.* (2015), fala do esforço para ajudar tomadores de decisão no planejamento para o futuro da navegação fluvial no rio São Francisco, onde uma parceria internacional entre o órgão do governo brasileiro Companhia do Desenvolvimento do Vale do São Francisco - CODEVASF e o corpo de engenharia do exército dos Estados Unidos da América (USACE) foi feita. Desta parceria, obtiveram sucesso no desenvolvimento de um modelo SWAT da bacia hidrográfica para compreender melhor o acúmulo de sedimentos no canal de navegação e nos reservatórios, confirmando-se os resultados de trabalhos como os de Lima (2001).

Além de problemas relacionados à navegação e à diminuição da capacidade de armazenamento das barragens, advindos do assoreamento ocasionado pelo acúmulo de sedimentos, outros problemas foram diagnosticados na modelagem de Creech *et al.* (2015), como o a diminuição do aporte de sedimento para a região do estuário do rio e para a zona costeira adjacente, causando graves desequilíbrios para a cadeia trófica estuarina e marítima.

Oliveira (2003) cita que a retenção de sedimentos nos reservatórios, associada à perda da capacidade de transporte do rio, devido à diminuição da vazão e a ausência de cheias na região do Baixo São Francisco gerou uma diminuição significativa do material em suspensão tanto no trecho das lagoas marginais e várzeas inundáveis da região do Baixo quanto na região estuarina do rio. Em 1970, a carga de material em suspensão medida no rio São Francisco na região da sua foz foi de $6,9 \times 10^6$ toneladas (MILLIMAN, 1975), já em 2001, foi de apenas $0,4 \times 10^6$ toneladas, havendo uma redução de mais de 90%.

Segundo Oliveira *et al.* (2003), com a construção de Xingó ocorreu um novo arranjo operacional, executado pela CHESF (Companhia Hidrelétrica do São Francisco) e pela ONS, com regularização das vazões e o fim das cheias na região do baixo curso do rio e, por conseguinte, a diminuição significativa do material em suspensão na região da foz do rio, refletindo na praia do Cabeço, que sofre contínuo processo de erosão por falta de reposição de sedimentos. O autor constata que, além dos aspectos físicos, degradaram-se modos de vida, fazendo perceber a ligação simbiótica que mantêm o homem e o meio ambiente, especialmente com o rio.

A drástica redução do aporte de sedimentos modificou não somente a porção continental da região da foz, mas está modificando toda a planície lamosa da zona costeira adjacente a esta. Medeiros (2007) afirma que o rio São Francisco transformou-se de um sistema de alta turbidez à transparente, devido à retenção de matéria ao longo da cascata de reservatórios. A porção mesohalina da Zona Marítima Estuarina - ZME oscila atualmente sobre o pró-delta e possui

maior turbidez (Material Particulado em Suspensão - MPS ~ 20-40mg/L) que o próprio rio (MPS ~ 5 mg/L). O empobrecimento de MPS do rio em relação ao pró-delta indica que a pluma de turbidez está atualmente sendo sustentada por processos de resuspensão de matéria dos sedimentos da planície lamosa depositados anteriormente à construção das barragens e da erosão costeira adjacente.

Esta planície lamosa da ZME é importante para o desenvolvimento de muitas espécies, inclusive do camarão sete barbas (*Xiphopenaeuskroyeri*, Heller), espécie nativa de grande valor econômico e que tem sofrido grandes mudanças na produção. Tonial (2011) esclarece que o volume de água doce que chega à foz tem diminuído de forma preocupante, acarretando a diminuição na oferta de nutrientes ao banco camaroneiro e deposição em áreas cada vez mais próximas do continente. Desta forma, promovendo a migração da população de peneídeos para águas mais rasas, de modo que os barcos que antes faziam arrasto a distâncias de até 5 milhas náuticas da costa, atualmente se concentram na zona até 2 milhas náuticas.

Estes sedimentos eram também importantes para a reprodução dos peixes nas lagoas marginais que eram cheias durante as cheias naturais do rio. Neste momento, os sedimentos da água, não apenas enriqueciam com nutrientes o leito das lagoas, como também criavam a ambiência favorável para o processo de reprodução. Araújo (2008) encontrou informações importantes a respeito da dinâmica das várzeas do baixo São Francisco. Ela, citando Barros (1985), relatou como as atividades humanas localizadas nas várzeas mantinham uma estreita relação com a dinâmica do rio, com seus ciclos anuais de cheias que inundavam essas áreas entre os meses de novembro e maio. Deste modo,

Durante este período, as atividades da população rural eram voltadas principalmente para a pesca de peixes e camarões, que proliferavam nas lagoas que se formavam no interior das várzeas. Quando as águas desciam, iniciava-se o plantio de arroz, de uma variedade mais alta, capaz de resistir a maiores períodos de inundação (BARROS, 1985, p. 108).

Portanto, além da influência ecológica que as cheias ofereciam, o regime do rio também determinava a dinâmica econômica e social da região, especialmente a partir da presença dessas áreas alagáveis, que imprimem a sua influência permanente em tudo (MEDEIROS NETO, 1941). Naquela época, as cheias equivaliam ao período da opulência da região, sendo o período de grandeza das águas e do povo (MEDEIROS NETO, 1941).

Se a problemática dos sedimentos já é preocupante, assoma-se a questão da qualidade das águas, com a contaminação do corpo de água por fontes difusas e pontuais aumentando ainda

mais a gravidade do problema, pois afeta a disponibilidade de água compatível para consumo humano, como ocorre no rio São Francisco. A qualidade da água dos afluentes do rio São Francisco apresenta indícios de contaminação e que seus afluentes necessitam de um monitoramento constante que subsidie decisões de gestão ambiental adequadas à manutenção da saúde dos ribeirinhos e da biota dulce-aquícola (BRITTO *et al.*, 2018).

Em outra vertente, a irrigação tem sido vista como uma das maiores oportunidades para promover o desenvolvimento econômico e social na bacia do rio São Francisco, especialmente no nordeste semiárido. Cerca de 27% da superfície da bacia é apta à prática da agricultura, onde 3.000.000 ha tem potencial de serem irrigados, segundo os padrões do *United States Bureau of Reclamation- USBR* (1970). Se forem viabilizadas, com alturas de bombeamento até 60m, esta área amplia-se para 8.000.000 ha, conforme o Plano Diretor para o Desenvolvimento do Vale do São Francisco. Em 2012, a área irrigada na bacia era de 626.941 ha, correspondendo a um aumento de cerca de 84% em relação ao diagnosticado pelo Plano de Recursos Hídricos da bacia hidrográfica do rio São Francisco (2004-2013). Metade dessa área fica no extremo oeste Baiano e no Vale do Franciscano da Bahia. (ANA, 2004; CBHSF, 2016 pp.281)

Avaliações conjuntas entre as empresas geradoras de energia e a CODEVASF (1989) estimaram que até o limite de 800.000 ha irrigados não se instalam conflitos significativos de usos entre esses dois setores. A partir daí, será necessário negociar e se estabelecer regras e critérios de prioridades. Em 2003, a área irrigada era de 342.712 ha, havendo assim grande potencial para irrigação sem que ocorressem conflitos com a geração de energia (ANA, 2004). Ou seja, desde 1994 a CODEVASF observava que com o aumento da irrigação, e considerando a quantidade de terras adequadas inexploradas, logo seria excedida em muito a quantidade de água disponível.

Conforme Maneta *et al.* (2009), destarte o conflito, há ainda uma série de projetos que pretendem expansão da agricultura no alto e sub-médio São Francisco que, segundo os autores, se darão apoiados por melhores orientações técnicas e administrativas que maximizem o progresso econômico e social, minimizando riscos ambientais e econômicos. Essas expansões projetadas de agricultura irrigada são agrupadas em seis regiões. Tratam-se de áreas-alvo para o investimento e políticas de ação, uma vez que já estão significativamente desenvolvidas em termos de infraestrutura de irrigação, de modo que mais investimentos produzirão retornos rápidos por aumentar a produção para os mercados, acreditando-se que isto é que irá impulsionar o desenvolvimento em áreas vizinhas.

Análises do regime hidrológico durante o período após a implementação da usina hidrelétrica de Sobradinho, em 1978, mostram que os efeitos de barragens são responsáveis por 59% das mudanças hidrológicas no meio ambiente. Ao mesmo tempo, o clima (em condições mais secas) contribuiu com 41% do total de mudanças. Os efeitos de barragens resultam não só de seu funcionamento e capacidade de regulação, mas também das elevadas perdas por infiltração e evaporação em seus reservatórios e para irrigação (GENZ & LUZ, 2012).

Também nesta direção, o plano decenal para a gestão dos recursos hídricos na Bacia do Rio São Francisco inclui a expansão da agricultura irrigada em mais de 550.000 ha (ANA, 2004), fato que àquela época já justificava também grande expectativa de causar conflitos com outros usos de água concorrentes de importância estratégica, como geração de energia hidrelétrica e o abastecimento humano. Segundo o Macro Zoneamento Ecológico-Econômico da bacia do rio São Francisco (MMAa, 2016), em 2012, a área irrigada identificada era de 626,94 mil ha, correspondendo a um aumento de cerca de 84%, em relação à área identificada em 2003.

A EMBRAPA estimou que o crescimento das áreas irrigadas no oeste baiano entre 1985 a 2000 foi de 526%, em contrapartida, os processos de erradicação e degradação das formações vegetais naturais também são relevantes, destacando-se a conversão de 881 mil ha de cerrado em uso agropecuário, o que representa um decréscimo de 21% da sua área total na região no intervalo de 15 anos. Segundo a AIBA (2006), a região do oeste baiano conta atualmente com mais de 1,5 milhão de hectares de terras em produção, tendo a soja como cultura detentora da maior área plantada (870.000ha), seguida do algodão com mais de 210.000ha plantados.

As características dos projetos de irrigação na região priorizam o uso das águas superficiais ao longo dos rios. Enquanto que nas áreas de cultivo mais distantes e naquelas onde já se esgotou o volume máximo outorgável de água superficial, utilizam a captação subterrânea na forma de bombeamento para irrigação por pivô-central. (GASPAR, 2006)

As questões da expansão das áreas irrigadas estão associadas a projeções de elevado empirismo, haja vistas as análises que são apresentadas por Gaspar (2006) que informa que para o cálculo do montante explotável do aquífero concorrem vários fatores que dependem do conhecimento do aquífero, e por isso ainda há uma grande discussão em andamento no meio técnico referente aos valores da reserva permanente que deve ser considerado nesse cálculo e ainda, se a reserva reguladora poderia ser considerada integralmente na composição do cálculo. A autora enfatiza que estes são conceitos ainda subjetivos no meio científico.

Gaspar (2006) acrescenta que a compactação é o principal problema observado para a recarga do aquífero, sendo resultante de diversas intervenções antrópicas referentes à grande extensão das atividades agropecuárias. A compactação faz aumentar o escoamento superficial e segundo a autora foi constatada a partir de mudanças das condições de infiltração da água nos solos, materializadas pela redução dos valores de condutividade hidráulica vertical desses solos (notadamente nos primeiros 30cm mais superficiais). Com isso percebe-se que a situação é bastante grave, pois, na medida em que se estimula a expansão do agronegócio, que vai captar as águas subterrâneas para irrigação, ao mesmo tempo está a se infligir uma redução da permeabilidade dos solos e consequentemente da recarga dos aquíferos, o se irá às ocorrências das sazonalidades das chuvas. É uma problemática típica que requer abordagem interdisciplinar, para que se consigam bons resultados no seu planejamento e gestão.

Em relação à bacia hidrográfica do rio São Francisco são encontrados diversos artigos que tratam das questões ligadas a não estacionariedade das vazões afluentes aos grandes reservatórios (VALENÇA et al., 2017; VALENÇA et al., 2015; SOUZA et al., 2013; ANA, 2013). Quanto à estacionariedade das chuvas, por seu turno, durante a realização do presente estudo se teve conhecimento de que estava sendo conduzida uma pesquisa sobre este tema onde a bacia do São Francisco é a área de interesse, contudo trata-se de estudos de pós-graduação, doutorado, na Universidade Federal Rural do Pernambuco e os dados e resultados estavam ainda restritos.

2.5. Crise hídrica

Alguns termos requerem uma explicação de como se estruturam suas várias formas, em busca de uma melhor compreensão de como se aplicam a cada contexto. Desse modo, entender o termo “crise hídrica” passa por uma visão holística de como o mesmo se construiu ao longo do tempo.

Isso se dá em qualquer busca humana por sentido. Costuma-se haver um exercício de rememoração do passado pelos homens, a fim de poderem tornar o futuro esperável. O “pensar histórico” é algo cotidiano e intrínseco ao fato de se estar no mundo, é uma busca de respostas para as perguntas da vida prática (RÜSEN, 2001). As ideias são tratadas, nesse contexto de busca por respostas, como modelos teóricos de significação, que geram uma perspectiva que permite articular o interesse com a pesquisa, de modo a formalizar um campo de questões sobre o qual torna-se evidente um interesse, tornando possível a elaboração de perguntas específicas ao passado.

Portanto, para uma melhor orientação teórica, é necessário pensar no termo a partir de um sentido histórico, de seus usos e aplicações, e de um sentido etimológico com as significações que são atribuídas, condicionando o sentido socio-histórico. É comum a referência a um ideograma chinês que expressa a ideia de crise, justapondo símbolos de perigo e oportunidade, paralelamente. Contudo, no ocidente, etimologicamente a palavra surge do grego *krisis*, que significa ação ou faculdade de distinguir, decisão. O conceito de “crise” surgiu com os gregos, inicialmente nas áreas de teologia, medicina e direito, e transmitia a oposição de escolhas entre alternativas extremas. Assim, estaria presente em todas as áreas da vida, inerente à demanda por decisões e escolhas.

A partir do século XVII, o termo expandiu-se para a política, economia, história e psicologia, sendo posteriormente bastante aplicado em referências à Revolução Francesa e Americana, conforme demonstra Faria (2017). Crise representaria, então, um novo senso de tempo, indicando e intensificando o fim de um período (KOSELLECK, 2006). No latim, “*crisis*” significa o momento de decisão e de mudança súbita. Gregos e romanos associavam o termo a um momento decisivo de uma doença que pode evoluir para a cura ou para a fatalidade.

Assim, Hipócrates de Cós (460-377 a.C.), considerado o pai da medicina, deixou a “coleção hipocrática”, onde descreve que as doenças evoluem silenciosamente, durante certo tempo e, posteriormente, se localizam em uma parte do corpo. O momento determinante da evolução é a “crise”, momento em que a doença se define rumo à cura ou não. Portanto, cabe ao bom médico identificar o “momento oportuno” da sua intervenção, a oportunidade não dura muito tempo; conseqüentemente, não há tempo a perder (CAIRUS, 2005).

Segundo o dicionário Aurélio *online*, crise pode significar: Mudança súbita ou agravamento que sobrevém no curso de uma doença aguda; Manifestação súbita de um estado emocional ou nervoso; Conjuntura ou momento perigoso, difícil ou decisivo; Falta de alguma coisa considerada importante; Embaraço na marcha regular dos negócios; Desacordo ou perturbação que obriga instituição ou organismo a recompor-se ou a demitir-se (AURÉLIO, 2018).

Já o Dicionário Michaelis (2018) *online*, acrescenta alguns sentidos importantes para a palavra na Sociologia (Conjuntura desfavorável; situação anormal e grave; conflito, tensão, transtorno), na Economia (Momento de transição entre uma fase de prosperidade e outra de depressão, ou vice-versa) e na Política (Situação de conflito de extrema intensidade em que estão presentes altas expectativas de uso da violência).

Na crise do Estado, quando percebida no âmbito da governabilidade, é apresentada por diversos autores sob três tipos de explicação: como problema de natureza política decorrente do excesso de demandas e da diminuição da autoridade (crise de democracia); como produto de uma sobrecarga de problemas a que o Estado responde com a ampliação dos seus serviços, aumentando suas despesas (crise fiscal do Estado); como produto da contradição entre as necessidades de garantir a acumulação e manter a legitimação, gerando problemas de gestão e de legitimação (crise de racionalidade).

No primeiro tipo de explicação, seu argumento diz que o desenvolvimento da democracia passa pelo aumento da participação e pela institucionalização dos processos e das organizações políticas. O problema é que essa vitalidade, muitas vezes é acompanhada pela diminuição da autoridade. Num momento em que se requer mais e mais intervenção do Estado, a crise de autoridade reduz a confiança dos cidadãos nas instituições do governo provocando uma diminuição de sua capacidade para enfrentar os problemas, dentro de um círculo vicioso que pode ser definido como a “espiral da não governabilidade” de Bobbio (COSTA, 2010).

As duas últimas interpretações ainda são tributárias da herança marxista. A da crise fiscal do Estado está associada, sobretudo, ao nome de James O'Connor, sendo uma manifestação da inexorável crise do capitalismo. Neste caso, ela decorre do descompasso entre o crescimento do produto nacional bruto e a elevação dos custos dos programas públicos e das demandas dos trabalhadores. Esse desequilíbrio tem impacto sobre a eficácia do governo e sobre o consenso social que o legitima. Trata-se da contradição fundamental entre a necessidade de criar condições para uma rentável acumulação do capital e, ao mesmo tempo, garantir condições de harmonia social (COSTA, 2010). Na tradição da ciência política, as crises de estado sempre foram tratadas como “enfermidades”, ou seja, como pioras no funcionamento de um determinado sistema político ou dinâmicas que terminaram por corromper a estrutura anterior, substituindo-a por uma nociva à harmonia social.

As crises na contemporaneidade, por outro lado, são tratadas majoritariamente como uma questão de escolhas. A passagem do modernismo para o pós-modernismo se deu com a substituição de uma escolha no contrato social tacitamente assinado entre os cidadãos e seus governos: se na modernidade havia uma preferência pela segurança e estabilidade em detrimento do risco e da liberdade, na pós-modernidade opta-se pela liberdade e por uma lógica de consumo individualizante em detrimento da segurança e da privacidade.

Nas Ciências Sociais, Pearson (1998) explica que as crises podem ser olhadas por 3 diferentes perspectivas. Aqui, iremos nos ater a duas delas: uma puramente técnica, que nos remete para a dinâmica estrutural, infraestrutural, técnica e operativa de um sistema, onde se salientam em perspectiva os fenômenos, apelando às variáveis definidoras físicas e técnicas e uma outra vertente, que vai além da materialidade objetiva, mais fixada na realidade humana, numa perspectiva sociopolítica onde a crise é encarada como uma quebra coletiva do sentido partilhado e da estruturação dos papéis sociais e onde se verifica uma transformação, ainda que marginal, da ordem social, da liderança e dos valores e crenças tidas como comuns.

Em suma, ‘crise’ passa a aparecer como um conceito-chave na história, usado para caracterizar períodos ou estruturas. O conceito de crise se tornou então, o fundamental modo de interpretação do tempo histórico, englobando períodos de transição críticos que representam mudanças (KOSELLECK, 2006). Não há nenhuma área da vida que não tenha sido examinada e interpretada a partir do conceito de crise, demandando decisões que se tornam gradativamente mais importantes conforme a quantidade de informações e o acesso a elas aumentam exponencialmente.

Desde as grandes guerras e da Grande Depressão, a crítica cultural passou a realizar nas interpretações globais uma adoção do termo crise. Em todas as ciências humanas e sociais, crise parece um conceito-chave para caracterizar épocas e estruturas. O conceito partiu da medicina e expandiu-se para a psicologia, antropologia, etnologia, sociologia da cultura e para a própria Filosofia da Ciência. Acima de tudo isso, a mídia exerceu uma função de aumento na utilização do termo a partir de suas manchetes. Koseleck (2006) demonstra que pelo menos 200 contextos diferentes foram compilados na imprensa para o termo crise, aparecendo como adjetivo, tema ou palavra que define alguma área de atuação ou do conhecimento. “Crise” é um termo comumente utilizado de forma intercambiável com “conflito”, “revolução”, dentre outros que possuem implicações diferentes, porém são integrados ao termo geral, que tem ganhado maior generalidade.

É deste modo que o conceito de “crise hídrica” é de ordem deveras complexa, pois diferentemente do conceito de “natureza” que emerge daquela *physis* dos gregos pré-socráticos, no interesse da sua apropriação como bem de consumo, mas que logo será incorporado pelo conceito de “meio ambiente”, o conceito de crise passa por um processo expansivo, comportando adjetivação, pois não há como o mesmo, ser absorvido por um novo verbete, sem a perda do seu sentido.

A crise envolve aquele momento crucial que sucederá à ação decidida - aquele momento onde Einstein veria o “acaso” e Lucrécio o seu *clinamen* - momento que, segundo Prigogine (2002), está inexoravelmente subordinado à “seta do tempo”, no que tange ao ponto exato em que se dará a sua “irreversibilidade”, para um “devir” de vida ou de morte. Assim, que o termo “crise”, adjetivado pela palavra “hídrica” irá trazer para si várias outras crises como a crise da disponibilidade das suas quantidades, a crise econômica (local e não local), a crise sociopolítica, assim como a crise dos valores éticos, associada à proximidade de um clímax da capacidade de suporte da natureza, irão determinar em maior ou menor medida os níveis de oferta e de demanda e as possibilidades do exercício de uma governança exemplar das águas.

2.6. Referências

- ABBASPOUR, K.C., YANG, J., MAXIMOV, I., SIBER, R., BOGNER, K., MIELEITNER, J., SRINIVASAN, R. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. **Journal of hydrology**, v. 333, n. 2-4, p. 413-430, 2007.
- ADRIOLO, M.V., SANTOS, I. D., GIBERTONI, R. C., CAMARGO, A. D. Calibração do modelo SWAT para a produção e transporte de sedimentos. **Simpósio Brasileiro Sobre Pequenas e Médias Centrais Hidrelétricas**, v. 6, p. 1-18, 2008.
- AGUIAR NETTO, A. O., MENDONÇA FILHO, C. J. M., ROCHA, J C S. **Águas de Sergipe**: reflexões sobre cenários e limitações. In: AGUIAR NETTO, A. O.; GOMES, L. J.. (Org.). Meio Ambiente: distintos olhares. 1ed. São Cristóvão: Universidade Federal de Sergipe, v. 1, pp. 39-70, 2010.
- AGUIAR NETTO, A.O., LUCAS, A. A. T., SANTOS, A. G. C., ALMEIDA, C. A. P. Água e Ambiente no Baixo São Francisco. In: AGUIAR NETTO, A.O.; LUCAS, A.A.T. **Águas do São Francisco**. São Cristóvão: Editora UFS, 2011.
- ALEMAR, A. **Geopolítica das águas**: o Brasil e o direito internacional fluvial. 2006.
- ALONSO, A., COSTA, V., MACIEL, D. Identidade e estratégia na formação do movimento ambientalista brasileiro. **Novos estudos-CEBRAP**, n. 79, pp. 151-167, 2007.
- ANA, Subprojeto 1.1. B - **Determinação da carga de nutrientes do rio São Francisco na região de sua foz**. ANA/GEF/PNUMA/OEA, Maceió-AL, 2004.
- ANA. **Análise de estacionaridade das séries de vazões naturais afluentes em usinas hidroelétricas localizadas na bacia do rio São Francisco e nas bacias adjacentes dos rios Tocantins, Paranaíba e Grande**. 2013.
- ANA. **Sala de Situação da Agência Nacional de Águas: Rio São Francisco**. 2018. Acesso em:

16/07/2018, Disponível em: <<http://www3.ana.gov.br/portal/ANA/sala-de-situacao/sao-francisco/sao-francisco-saiba-mais>>

ANA/GEF/PNUMA/OEA, Agência Nacional de Águas; GEF - Fundo Mundial para o Meio Ambiente; PNUMA - Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente; OEA - Organização dos Estados Americanos. **Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco 2004-2013**, 2004.

ANDRADE, A.M. **Simulação hidrológica numa bacia hidrográfica representativa dos latossolos na região alto Rio Grande**. Lavras: UFLA, 2011.

AQILI SW, HONG N, HAMA T, SUENAGA Y, KAWAGOSHI Y. Application of modified tank model to simulate groundwater level fluctuations in Kabul basin, Afghanistan. **Journal Water Environment Technology** 14(2):57–66. 2016.

ARAÚJO, J.S., PEREIRA DE SÁ, M.F. Sustentabilidade da piscicultura no baixo São Francisco alagoano: condicionantes socioeconômicos. **Ambiente & Sociedade**, v. 11, n. 2, 2008.

ARAÚJO, S. M. V. G. Origem e principais elementos da legislação de proteção à biodiversidade no Brasil. In: GANNEN, Roseli S. (Org.). **Conservação da biodiversidade: legislação e políticas públicas**. Brasília: Câmara dos Deputados, Edições Câmara, 2011. p. 177-221.

ARAÚJO, S. S., AGUIAR NETTO, A. O., GOMES, L. J. A percepção ambiental, identidade e pertencimento dos moradores do povoado Cabeço, em Brejo Grande/SE, frente às inundações na foz do rio São Francisco. **Revista Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 36, pp. 239-253, 2016.

ARAÚJO, S.S., NETTO, A.O.A., GOMES, L.J. A percepção ambiental, identidade e pertencimento dos moradores do povoado Cabeço, em Brejo Grande/SE, frente às inundações na foz do rio São Francisco. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 36, 2016. p. 239-253.

ARNOLD, J. G., WILLIAMS J. R. SWRRB - a watershed scale model for soil and water resources management. In Singh V. P., editor, **Computer Models of Watershed Hydrology**, Highlands Ranch, CO, 1995. pp. 849-908.

ARNOLD, J.G. et al. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development 1. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, 1998, v. 34, n. 1, p. 73-89.

ARNOLD, J.G., ALLEN, P. M., MUTTIAH, R., BERNHARDT, G. Automated base flow separation and recession analysis techniques. **Groundwater**, 1995, v. 33, n. 6, pp. 1010-1018.

ARNOLD, J.G., WILLIAMS, J. R., NICKS, A. D., SAMMONS, N. B. SWRRB—A watershed scale model for soil and water resources management. In Singh V. P., editor, **Computer Models of Watershed Hydrology**, Highlands Ranch, CO, 1995, pp. 849-908.

AURÉLIO. Significado de crise, 2018. Disponível em: <<https://dicionariodoaurelio.com/crise>>. Acesso em: abr. 2018.

BAFFAUT, C, ARNOLD, J.R., SCHUMACHER, J.S. Fecal coliform fate and transport simulation with SWAT. **2nd International SWAT Conference**. TWRI Technical Report 266. Baria/Italy. 2003.

BARROS, H.O.M. Modernização agrícola autoritária e desestruturação do ecossistema: o caso do Baixo São Francisco. **Revista Cadernos de Estudos Sociais**, Recife, v. 1, n. 1, p. 97-114, 1985.

BATISTELA, A.C., BONETI, L.W. A relação homem/natureza no pensamento moderno. **CONGRESSO NACIONAL DE EDUCAÇÃO–EDUCERE**, pp. 1099-1116, 2008.

BITTENCOURT, S., GOBBI, E.F. Carga máxima de fósforo admissível ao reservatório Piraquara II, uma aplicação do processo TMDL. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa, v. 30, n. 3, 2006.

BLAINSKI, E., SILVEIRA, F.A., CONCEIÇÃO, G. Utilização do modelo hidrológico SWAT para estudos na microbacia hidrográfica do rio Aranguará/SC. In: **Taller International Red Riegos Cyted**. Florianópolis: CEER, 2008.

BRASIL. Lei Nº 9433/1997 - "Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989". Data da legislação: 08/01/1997 - **Diário Oficial da União**, Brasília, 09 de jan. Seção 1. p. 470, 1997.

BRESSIANI, D. A., D., GASSMAN, P. W., FERNANDES, J. G., GARBOSSA, L. H. P., SRINIVASAN, R., BONUMÁ, N. B., MENDIONDO, E. M. Review of soil and water assessment tool (SWAT) applications in Brazil: challenges and prospects. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 8, n. 3, p. 9-35, 2015.

BRITTO, F.B., NETTO, A.O., VASCO, A.N., SILVA, M.G. Aplicação do modelo SWAT para avaliar o potencial de contaminação por agrotóxicos num afluente do rio São Francisco, Brasil. **ScientiaPlenna Magazine**. v.13, n.10, 2017. pp.15. Disponível em:<[doi: 10.14808/sci.plena.2017.109910](https://doi.org/10.14808/sci.plena.2017.109910)>

BRITTO, F.B., SILVA, T.M.M., VASCO, A.N., AGUIAR NETTO, A.O., CARVALHO, C.M. Impactos da produção do arroz inundado na qualidade da água do Rio Betume, Sergipe. **Revista Agropecuária Técnica**. v.37,n.1, 2016. pp.44-54.

Disponível em:<<http://periodicos.ufpb.br/ojs/index.php/at/index>>

BRITTO, F.B.; VASCO, A.N.; NETTO, A.O.A. GARCIA, C.A.B.; MORAES, G.F.O.; SILVA, M.G. Surface water quality assessment of the main tributaries in the lower São Francisco River, Sergipe. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.23, n. 28, 2018.

BURNET, J. **Greek philosophy: Thales to Plato**. Ed. Macmillan and company limited, Londres, 1950. p.371.

CAIRUS, H.F.; RIBEIRO JR., W.A. **Textos hipocráticos: o doente, o médico e a doença**. Rio de Janeiro: FIOCRUZ, 2005. p.252

CAMPOS, J. N. B. A gestão integrada dos recursos hídricos: uma perspectiva histórica. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, v. 1, n. 1, p. 111-121, 2013.

CARVALHO, A. D. **Previsão de aflúências diárias para horizontes de 1 a 7 dias através de uma abordagem estocástica**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)– Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

CARVALHO, A. D. **Reservatórios de Regularização de Usinas Hidrelétricas: Contribuição para uma Matriz Energética mais Limpa**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) –Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, 2015.

CBHSF, Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. **RF3-Resumo executivo do Plano de Recursos Hídricos da bacia hidrográfica do rio São Francisco 2016-2025**. Alagoas, 2016. p. 300.

CBHSF(b), Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. **RF2-Resumo executivo do Plano de Recursos Hídricos da bacia hidrográfica do rio São Francisco 2016-2025: Volume 1 - Diagnóstico e Cenários**. Alagoas, 2016. p. 282.

CHOW, V.T., MAIDMENT, D.R., MAYS, L.W. **Applied hydrology**. New York: McGraw-Hill, 1988.

COSTA, F. L. **Reforma do Estado e contexto brasileiro: crítica do paradigma gerencialista**. Editora FGV, 2010.

COSTA, F.C. **A evolução do movimento ambientalista brasileiro**. Disponível em:

<<http://iesam.org.br/documentos/Movimento%20Ambientalista.pdf>>. Acesso em ago. 2018.

COSTA, R. Do fim do Mundo Antigo à Alta Idade Média (100-600 dC). **International Studies on Law and Education**, v. 7, p. 97-102, 2011.

CREECH, C.T. et al. **Anthropogenic impacts to the sediment budget of São Francisco River navigation channel using SWAT**. 2015.

CUNHA, L.K. **Sistemas avançados de previsão hidrológica e operação hidráulica em tempo real**. 2004.

DE ALMEIDA, F.H.M. O domínio nacional e seus descobrimentos. **Revista de Direito Administrativo**, v. 64, p. 36-51, 1961.

DHAR, S., MAZUMDAR, A. Hydrological modelling of the Kangsabati river under changed climate

scenario: case study in India. **Hydrological Processes: An International Journal**, v. 23, n. 16, pp. 2394-2406, 2009.

DOOGE, J.C.I. Linear theory of hydrologic systems. **Technical Bulletin** No. 1468. Agricultural Research Service/United States Department of Agriculture, Washington, D.C., 1973. p.341.

DRAKE, B.L. Mudanças na Oscilação do Atlântico Norte impulsionaram as Migrações Populacionais e o Colapso do Império Romano do Ocidente. **Nature - Scientific Reports** 7:1227, 2017.

EMPINOTTI, V.L. E se eu não quiser participar? O caso da não participação nas eleições do comitê de bacia do Rio São Francisco. **Ambiente & Sociedade**, v. 14, n. 1, p. 195-211, 2011.

FARIA, D.J. A Percepção do conceito de ‘crise’ para Fernand Braudel e Reinhart Koselleck um exercício a partir do conceito de matriz disciplinar de Jörn Rüsen. **Anais XXIX Simpósio Nacional de História**, Brasília, 2017.

FERNANDES, J. G. **Estimativa de Vazão e Produção de Sedimentos na bacia hidrográfica do rio São Francisco, utilizando o modelo SWAT**. 2015. Tese (Doutorado em Geografia), - Universidade Federal do Pernambuco, Recife-PE, 2015.

FERREIRA, J.A.S., DO ESPÍRITO SANTO, C.M., MANZI, A.O. **Calibração de um Modelo Hidrológico para a Bacia do São Francisco**. INPE-CPTEC, Campinas-SP, 2011.

FONTES, L. C. S., BITENCURTI, D. P., FONTES, M. P., PASSOS, D. R. Evolução histórica vs. mudanças recentes das feições emersas e submersas da desembocadura do rio São Francisco: uso do geoprocessamento na avaliação de impactos de grandes barragens. In: **IV Simpósio Regional de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto**, 2008, Aracaju, Sergipe. IV GEONORDESTE. Aracaju: Rede Sergipe de Geotecnologia, 2008.

FONTES, L. C. S., DOMINGUEZ, J. M. L., LATRUBESSE, E.E., SANTOS, C. M., MENDONÇA, J. B. S., BITENCURTI, D. P. Aplicações de estudos da morfodinâmica fluvial e deltaica na definição de vazões ecológicas em grandes rios: o caso do baixo curso do rio São Francisco. In: **IV congresso argentino de cuaternario y geomorfologia**, II reunião sobre el cuaternario de america del sur. La Plata, 2009.

FREIRE, R. C. Aspectos históricos da legislação ambiental no Brasil: da ocupação e exploração territorial ao desafio da sustentabilidade. **História e Cultura**, v. 4, n. 3, p. 156-179, 2015.

GASSMAN, P.W., REYES, M. R., GREEN, C. H., ARNOLD, J. G. The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 4, pp. 1211-1250, 2007.

GENZ, F., LUZ, L. D. Distinguishing the effects of climate on discharge in a tropical river highly

impacted by large dams. **Hydrological sciences journal**, v. 57, n. 5, pp. 1020-1034, 2012.

GIOSAN, L., CLIFT P. D., MACKLIN, M. G., FULLER, D. Q., CONSTANTINESCU, S., DURCAN, J. A., STEVENS, T., DULLER, G. A. T., TABREZ, A. R., GANGAL, K., ADHIKARI, R., ALIZAI, A. FILIP, F., LANINGHMAN, S.V., SYVITSKI, J.P. M. Fluvial landscapes of the Harappan civilization. **Proceedings of the National Academy of Sciences**. Jun 2012, 109 (26) E1688-E1694; DOI:10.1073/pnas.1112743109

GODARD, O. **Environnement Soutenable et Développement Durable**: Le modèle néo-classique en question. Paris: Environnement et société, 91, CIRED. 1991.

GREEN, W.H.; AMPT, G.A. Studies on soil physics-1. The flow of air and water through soils. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v.4, n.1, p.1-24, 1911.

HENKES, S. L. **As decisões político-jurídicas frente à crise hídrica e aos riscos: lições e contradições da transposição do rio São Francisco**. Florianópolis, 2008. 451 f. 2008.

HOLANDA, F. S. R., ISMERIM, S. S., ROCHA, I. P., JESUS, A. S., ARAUJO FILHO, R. N., MELLO JÚNIOR, A. V. Environmental Perception of the São Francisco River in ePopulation in Regards to Flood Impact. **Journal - Hum Ecol**, 28(1), pp. 37-46, 2009.

HONG N, HAMA T, SUENAGA Y, AQILI SW, HUANG X, WEI Q, KAWAGOSHI Y. Application of a modified conceptual rainfall-runoff model to simulation of groundwater level in an undefined watershed. **Sci Total Environment**, 541:383-390. 2016.

HORTON, R. E. The role of infiltration in the hydrologic cycle. **Transactions American Geophysical Union**, 14th Ann. Mtg., pp. 456-460, 1933.

JUNSAWANG, P., ASAVANANT, J., LURSINSAP, C. **Artificial Neural Network Model for Rainfall-Runoff Relationship**. Chiang Mai, Tailândia, p. 267-273, 2007. Disponível em:

<www.mcc.cmu.ac.th/ASIMMOD2007/downloadpdf.asp?filedownload=C07_P.%20Junsawang.pdf>. Acesso em jun. 2015.

KESSELRING, T. O conceito de natureza na história do pensamento ocidental. **Episteme (Porto Alegre)**: filosofia e história das ciências em revista. Porto Alegre, 2000.

KHUN, T.S. **A estrutura das revoluções científicas**. São Paulo, 1962.

KIM, J. H.; PAIK, K. R.; LEE, D. R.; KIM, H. S. Comparison of Optimization Algorithms in Parameter Calibration of Tank Model. In: **Congress –International Association for Hydraulic Research**. Holanda, Proceedings, 2001.

KIM, J.H., PAIK, K. R., LEE, D. R., KIM, H. S. Comparison of optimization algorithms in parameter

- calibration of Tank Model. In: **PROCEEDINGS OF THE CONGRESS-INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR HYDRAULIC RESEARCH**, p. 272-277, 2001. Disponível em: <http://www.iahr.org/elibrary/beijing_proceedings/Theme_A/COMPARISON%20OF%20OPTIMIZATION%20ALGORITHMS.html>. Acesso em mai. 2018.
- KNISEL, W.G. **CREAMS: a field scale model for Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems [USA]**. United States. Dept. of Agriculture. Conservation research report (USA), 1980.
- KOSELLECK, R. **Futuro passado**. Rio de Janeiro: Contraponto, 2006.
- KOUTSOYIANNIS, D. (2006). Nonstationarity versus Scaling in Hydrology. **Journal of Hydrology**, 324(1-4), pp. 239–254.
- LACEY, H. O lugar da ciência no mundo dos valores e da experiência humana. **Scientiae Studia**, v.7,n.4, São Paulo , 2009.
- LAYRARGUES, P. P. Do ecodesenvolvimento ao desenvolvimento sustentável: evolução de um conceito. **Revista Proposta**, v. 25, n. 71, p. 5-10, 1997.
- LELIS, T. A., CALIJURI, M. L. Modelagem hidrossedimentológica de bacia hidrográfica na região sudeste do Brasil, utilizando o SWAT. **Revista Ambiente Água**, v. 5, pp. 158-174, 2010.
- LEONARD, R. A.; KNISEL, W.G.; STILL, D. A. GLEAMS: Groundwater loading effects of agricultural management systems. **Transactions of the ASAE**. v. 30, n. 5, pp. 1403-1418, 1987.
- LIDNER, E.A. **Estudo de eventos hidrológicos extremos na Bacia do Rio do Peixe-SC com aplicação de índice de umidade desenvolvido a partir do TankModel**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) - UFSC, Florianópolis-SC, 2007.
- LIMA, J.E.F.W. **"Diagnóstico do fluxo de sedimentos em suspensão na Bacia do Rio São Francisco"** - Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, Brasília, 108p. 2001.
- LINDNER, E.A., KOBIYAMA, M. Proposal of Tank Moisture Index to predict floods and droughts in Peixe River watershed, Brazil. **IAHS Publication**, v. 331, pp. 314-323, 2009.
- LINO, J.F.L. **Análise da dinâmica hidrossedimentológica da bacia hidrográfica do Rio Preto (SC) com o modelo SWAT**. 2009.
- LINO, J.F.L., CORSUIL, C.W., KOBIYAMA, M. Análise da vazão da Bacia Hidrográfica do Rio Preto com o modelo SWAT. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 18. Campo Grande, 2009. **Anais...** Porto Alegre: ABRH, 2009.
- LITTLE, P.E. **Políticas ambientais no Brasil: análises, instrumentos e experiências**. Editora Peirópolis,

2003.

LOPES, N.H.Y. **Análise da produção de água e sedimentos em microbacias experimentais com o modelo SWAT**. 2008.

LOPES, N.H.Y., KOBAYAMA, M. Análise do equilíbrio hidrossedimentológico em uma microbacia experimental com o modelo SWAT e as características geomorfológicas. **VII Simpósio Nacional de Geomorfologia e II Encontro Latino-Americano de Geomorfologia**, 2008.

LOU, R.F. **Modelagem hidrológica chuva-vazão e hidrodinâmica aplicada na bacia experimental do rio Piabanha/RJ**. 2010. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010.

MANETA, M. P., TORRES, M., WALLENDER, W. W., VOSTI, S., KIRBY, M., BASSOI, L. H., RODRIGUES, L. N. Water demand and flows in the Sao Francisco River Basin (Brazil) with increased irrigation. **Agricultural Water Management**, v. 96, n. 8, pp. 1191-1200, 2009.

MCCORMICK, J. **Rumo ao paraíso: a história do movimento ambientalista**. Rio de Janeiro: Relume-Dumará, v. 224, 1992.

MEDEIROS NETO, L. **História do São Francisco**. Maceió, 203 p., 1941.

MEDEIROS, P.R.P., KNOPPERS, B.A., SANTOS JÚNIOR, R. C., SOUZA, W.F.L. Aporte Fluvial e Dispersão de Matéria Particulada em Suspensão na zona costeira do rio São Francisco (se/al). **Revista Geochimica Brasiliensis**, Vol. 21, pp. 212 – 231, 2007.

MEDEIROS, Y., PINTO, I.M., STIFELMAN, G.M., FARIA, A.S., PELLI, J.C.S., RODRIGUES, R.F., SILVA, E.R., COSTA, T., BOCACCIO, M.X., SILVA, E.B.G. **Participação social no processo de alocação de água no Baixo Curso do Rio São Francisco**. Relatório Final. Projeto Ecovazão, 2010.

MENDES, L.A. **O impacto dos usos consuntivos na operação de sistemas de reservatórios para produção de energia elétrica**. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica) - Universidade de São Paulo, 2012.

MICHAELIS, 2018. Crise. Disponível em:

<<http://michaelis.uol.com.br/busca?r=0&f=0&t=0&palavra=crise>>. Acesso em: abr. 2018.

MILLIMAN, J. D., SUMMERHAYES, C.P. Upper continental margin sedimentation off Brazil. In: BOCHUM, H.F., MOSCOW, A.P.L., MILLIMAN, J.D., KIEL E. S. **Contribution to Sedimentology**, ed. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung: Stuttgart, v. 4, 1975. p. 117-150.

MINELLA, J.P.G., WALLING, D.E., MERTEN, G.H. Combining sediment source tracing techniques with traditional monitoring to assess the impact of improved land management on catchment sediment

yields. **Journal of Hydrology**, v. 348, n. 3-4, pp. 546-563, 2008.

MMA(a). MacroZEE-BHSF. Atualização e Complementação do Diagnóstico do Macrozoneamento Ecológico-Econômico da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. **Relatório da Atualização e Complementação do Diagnóstico do Meio Físico-Biótico da BHSF**. Revisão Final - Tomo I. Brasil, 2016.

MORIASI, D.N., ARNOLD, J. G., VAN LIEW, M. W., BINGNER, R. L., HARMEL, R. D., VEITH, T. L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007.

MOURA, A.M.M. Trajetória da política ambiental federal no Brasil. In: **Governança ambiental no Brasil: instituições, atores e políticas públicas**/organizadora: MOURA, A.A.M.M. Brasília: Ipea, 2016. pp. 14-43. Disponível em:

<<http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/8470/1/Trajeto%20da%20pol%20tica%20ambiental%20federal%20no%20Brasil.pdf>>.

MURTHA, N.A., CASTRO, J.E., HELLER, L. Uma perspectiva histórica das primeiras políticas públicas de saneamento e de recursos hídricos no Brasil. **Ambiente & Sociedade**, v. 18, n. 3, p. 193-210, 2015.

NEITSCH, S. L., ARNOLD, J. G., KINIRY, J. R., WILLIAMS, J. R. **Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009**. Texas Water Resources Institute, 2011.

OLIVEIRA, A.M. **Estudo Hidrodinâmico Sedimentológico do Baixo São Francisco, Estuário e Zona Costeira Adjacente (AL/SE)**. UFAL. Maceió-AL, 2003.

OLIVEIRA, N.C.C. A grande aceleração e a construção de barragens hidrelétricas no Brasil. **Varia Historia**, Belo Horizonte, vol. 34, n. 65, 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/0104-87752018000200003>>

OLIVEIRA, S.M. **Análise do processo chuva-vazão de duas bacias hidrográficas na região litorânea do Estado do Paraná, através do modelo de tanque**. 1999.

PAPPAGALLO, G., LO PORTO, A., LEONE, A. Use of the SWAT model for evaluation of anthropic impacts on water resources quality and availability in the Celone Creek basin (Apulia- Italy). **2nd International SWAT Conference**. TWRI Technical Report 266. Baria/Italy. 2003.

PEARSON, C. M. **Reframing Crisis Management**, Academy of Management Review, Janeiro, 1998.

PINTO, D. S. P. Fundamentos e características gerais sobre o direito de propriedade romana e o direito de propriedade atual no Brasil. In: **Âmbito Jurídico**, Rio Grande, XI, n. 56, ago 2008.

PIRENNE, H. **História Econômica e Social da Idade Média**, 1982.

PRIGOGINE, I., FERREIRA, R.L. **As leis do caos**. Unesp, 2002.

RAYNAUT, C., ZANONI, M. **La Construction de l'interdisciplinarité en Formation intégrée de l'environnement et du Développement**. Paris:Unesco (Document préparé pour la Réunion sur les Modalités de travail de CHAIRES UNESCO DU DÉVELOPPEMENT DURABLE. Curitiba, 1993.

RASHID, H.; ENGLAND, E.; THOMPSON, L.; POLYAK, L. Late Glacial to Holocene Indian Summer Monsoon Variability Based upon Sediment Records Taken from the Bay of Bengal. **Terr. Atmos. Ocean. Sci.**, v.22, n.2, 2011. pp. 215-228.

ROCHA, G.S., SOARES, V. O. Resistência e participação dos movimentos sociais na construção de grandes barragens no Nordeste. **Encontro baiano de geografia**, v. 8, 2011.

ROMMEN, H. **The Natural Law: A Study in Legal and Social History and Philosophy**. Trad: HANLEY, T.R., Indianapolis: Liberty Fund, 1998. Disponível em: <<https://oll.libertyfund.org/titles/676>>

RUIZ, J.M.E. **Aplicación de modelos hidrológicos con fines de prevención de desastres en cuencas de Venezuela**. 2008. Dissertação (Mestrado em Desarrollo de los Recursos Aguas y Tierras mención Planificación de Recursos Hidráulicos) - Universidade de Los Andes Mérida, Venezuela, 2008.

RÜSEN, J. **Razão histórica: teoria da história: os fundamentos da ciência histórica**. Editora Universidade de Brasília, 2001.

SANTANA, N. R. F., AGUIAR NETTO, A.O., SOUZA, I., GARCIA, C.A. Salinidade na foz do rio São Francisco com uso de modelagem computacional. **Anais II Simpósio da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco**. Aracaju. 2018. p.10.

SAR - Sistema de Acompanhamento de Reservatórios/ANA. **Dados sintéticos das vazões diárias e mensais nos principais aproveitamentos hidrelétricos**. Disponível em: <<http://sar.ana.gov.br>>. Acesso em: 06/07/2017.

SARAIVA, F.A.S. **O Potencial Ecológico no Âmbito da Diretiva-Quadro da Água - Conceitos e metodologias de Definição**. Universidade Nova de Lisboa: Departamento de Ciências e Engenharia do Ambiente. Lisboa, 2010.

SHUIN, Y.; OTSUKA, I.; MATSUE, K.; ARUGA, K.; TASAKA, T.; HOTTA, N. Estimation of Shallow Landslides Caused by Heavy Rainfall Using Two Conceptual Models. **International Journal of Erosion Control Engineering** Vol. 7, No. 3 p. 92-100, 2014.

SILVA, A. M. D., CASATTI, L., ALVARES, C. A., LEITE, A. M., MARTINELLI, L. A., DURRANT, S. F. Soil loss risk and habitat quality in streams of a meso-scale river basin. **Journal Scientia Agricola**, v.64, n.4, pp.336-343, 2007.

SILVA, E.R. Um percurso pela história através da água: passado, presente, futuro. In: XXVII CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 2000, Porto Alegre-RS. **Anais** do XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental. Rio de Janeiro: ABES, 2000. Disponível em:

<<http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/saneab/xi-009.pdf>>

SILVA, M.G. **Modelagem ambiental na bacia hidrográfica do Rio Poxim-Açu/SE e suas relações antrópicas**. 2013. Tese (Doutorado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) - Universidade Federal de Sergipe, 224 p. São Cristóvão-SE, 2013.

SILVA-SÁNCHEZ, S.S. Política de meio ambiente no Brasil: a construção da cidadania ambiental. **Plural** (São Paulo. Online), v. 6, p. 20-46, 1999.

SITTNER, WALTER T. WMO project on intercomparison of conceptual models used in hydrological forecasting. **Hydrological Sciences Journal**, v. 21, n. 1, p. 203-213, 1976.

SOUZA, A., FERNANDES, W.A., PAVÃO, H.G., LASTORIA, G., GABAS, S.G. PARANHOS FILHO, A.C., SOUZA, R.S., KOFANOVSKI, A.Z. Análise de agrupamento para a precipitação para a gestão de águas pluviais no Mato Grosso do Sul. In: **Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 19, 2011, Maceió.

SOUZA, M.R.M., NEUMANN, S.L. Consequências socioeconômicas dos impactos antrópicos no estuário do rio São Francisco em Brejo Grande, Sergipe-Brasil. **Trabalho Oceanográfico**, v. 28, n. 1, pp. 97-116, 2000.

SOUZA, R.M., DOS SANTOS, I., KOBIYAMA, M. **O modelo SWAT como ferramenta para a gestão de recursos hídricos: avaliação de vazões de outorga na bacia hidrográfica do Altíssimo Rio Negro**. 2009.

SOUZA, S. A.; ARAUJO, A. A.; TROGER, F. H. Análise de estacionariedade das séries hidrometeorológicas localizadas na bacia do rio São Francisco. In **Anais** do XX Simpósio brasileiro de recursos hídricos, Bento Gonçalves, 2013.

STANESCU, V. A., MUSY, A. VICAIRE - Module 1B - Chapter 8. In: Virtual Campus In: STUART, T. M. C. **Hidrologia: Precipitação**. Universidade Federal do Ceará - UFC. Ceará. 2006. Apostila. Disponível em:

<http://www.barramentos.ufc.br/Hometiciana/Arquivos/Graduacao/Apostila_Hidrologia_grad/Cap_1_Introducao_2004.pdf>. Acesso em jan. 2018.

SUGAWARA, M. Tank model with snow component, **Research Notes of the National Research Center for Disaster Prevention**. v. 65, pp. 293, 1984, Tsukuba (Japão), 1984.

SUGAWARA, M. Tank Model, 1995. In: SINGH, Vijay P. et al. (Ed.). Computer models of watershed

- hydrology. Highlands Ranch, CO: **Water Resources Publications**, pp. 165-214. 1995.
- SYVITSKI, J., VÖRÖSMARTY, C. J., KETTNER, A. J., GREEN, P. Impact of humans on the flux of terrestrial sediment to the global coastal ocean. **Science**, v. 308, n. 5720, p. 376-380, 2005.
- TIMMERMAN, A., FRIEDRICH, T. Late Pleistocene climate drivers of early human migration. **Nature**, v. 538, n. 7623, p. 92, 2016.
- TONIAL, L.S.S. **Estrutura populacional do Camarão Sete-Barbas *Xiphopenaeus kroyeri* (HELLER, 1862) na Foz do rio São Francisco, Nordeste do Brasil**. 2011.
- TORRES, M.O.; MANETA, M.; HOWITT, R.; VOSTI, S.A.; WESLEY W.W.; BASSOI, L.H.; RODRIGUES, L.N. Economic impacts of regional water scarcity in the São Francisco River Basin, Brazil: an application of a linked hydro-economic model. **Environment and Development Economics** v.17, 2011. pp.227-248
- TOVAR, L. Para uma reconstrução do direito da água, **Actas do V Congresso Ibérico sobre Gestão e Planeamento da Água**, Faro, 2006.
- TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. 2. ed. Porto Alegre: ABRH: Editora da UFRGS, 2005.
- TUCCI, C.E.M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2ª Ed. Porto Alegre: Ed. da UFRGS: ABRH, 2000, 943 p.
- TUCCI, C.E.M. **Modelos hidrológicos**. Porto Alegre: Universidade/UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1998.
- TUNDISI, J. G. Recursos hídricos no Brasil: problemas, desafios e estratégias para o futuro. **Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências**, p. 47, 2014.
- VALENÇA, M. J. S.; HOLTZ, J.; KYRILLOS, D. (2015). A Água do Rio São Francisco Está Sumindo? In **Anais do XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Brasília, Nov. 2015.
- VALENÇA, M. J. S.; HOLTZ, J.; KYRILLOS, D. (2015). A Água do Rio São Francisco Está Sumindo? In **Anais do XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Brasília, 2015.
- VALENÇA, M. J. S.; MELO, H. Impacto da não estacionaridade da série de vazões naturais afluentes ao reservatório de Sobradinho na sua capacidade de regularização. In **Anais do XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Florianópolis, 2017.
- VASCO, A. N., DE OLIVEIRA AGUIAR NETTO, A., PRUSKI, F.F. Impactos das barragens na disponibilidade hídrica do Nordeste do Brasil. **Recursos Hídricos**, v. 38, n. 2, 2017.
- VASCO, A.N., AGUIAR NETTO, A.O.A., PRUSKI, F.F. Impacto das barragens na disponibilidade hídrica do Nordeste do Brasil. **Revista Recursos Hídricos**, v. 38, n. 2, p. 39-49, 2017.

- VASCONCELLOS, S.M. Desenvolvimento de um índice de umidade do solo derivado da versão distribuída do tank model. **Dissertação** (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Básico). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017. p.104.
- VASCONCELLOS, S.M., LAVAGNOLI, S., KOBAYAMA, M. Análise de eventos de seca no baixo rio São Francisco a partir do Tank Moisture Index. In: **Anais I Encontro Nacional de Desastres**. Porto Alegre, 2018.
- VOGEL, R. M. Stochastic and deterministic world views. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 125, n. 6, p. 311-313, 1999.
- VOROSMARTY, C.J., MEYBECK, M., FEKETE, B., SHARMA, K. **The Potential Impact of Neocartorization on Sediment Transport by the Global Network of Rivers**. Proceedings of the Fifth IAHS Scientific Assembly at Rabat, Morocos, April-May, eds, 1997.
- WANG, S., FU, B., PIAO, S., LU, Y., CIAIS, P., WANG, Y. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes. **Nature Geoscience**. 9. 10.1038/ngeo2602, 2015.
- WILLIAMS, J. R. The erosion-productivity impact calculator (EPIC) model - A case history. Philosophical Transactions of the Royal Society of London - **Biological Sciences Magazine**, 1990. pp. 421-428.
- YAN, Y., YANG, Z., LIU, Q., SUN, T. Assessing effects of dam operation on flow regimes in the lower Yellow River. **Procedia Environmental Sciences**, v. 2, p. 507-516, 2010.

CAPÍTULO 3 -METODOLOGIA

3.1. Bacia hidrográfica do rio São Francisco

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, a área da bacia hidrográfica do rio São Francisco é de aproximadamente 638.972 km². Ela está compreendida em áreas de cinco estados, Minas Gerais, Bahia, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Goiás e Distrito Federal, conforme pode ser observado na Figura 3.1. É a maior bacia hidrográfica que pertence totalmente ao território nacional, percorrendo regiões com variadas condições socioambientais e tendo usos distintos, como a geração de energia, consumo, lazer, turismo, agricultura, indústria e piscicultura ao longo do seu percurso e, por conseguinte, sofrendo alterações com relação ao volume e qualidade de suas águas.

Atualmente a bacia apresenta quatro subdivisões: Alto, Médio, Submédio e Baixo. De acordo com SIEGMUND-SCHULTZE *et al.* (2015), na prática, a divisão adotada tem por base os limites administrativos, e considera: Alto São Francisco (37%), Médio (42%), Submédio (17%) e Baixo São Francisco (4%) da área da bacia.

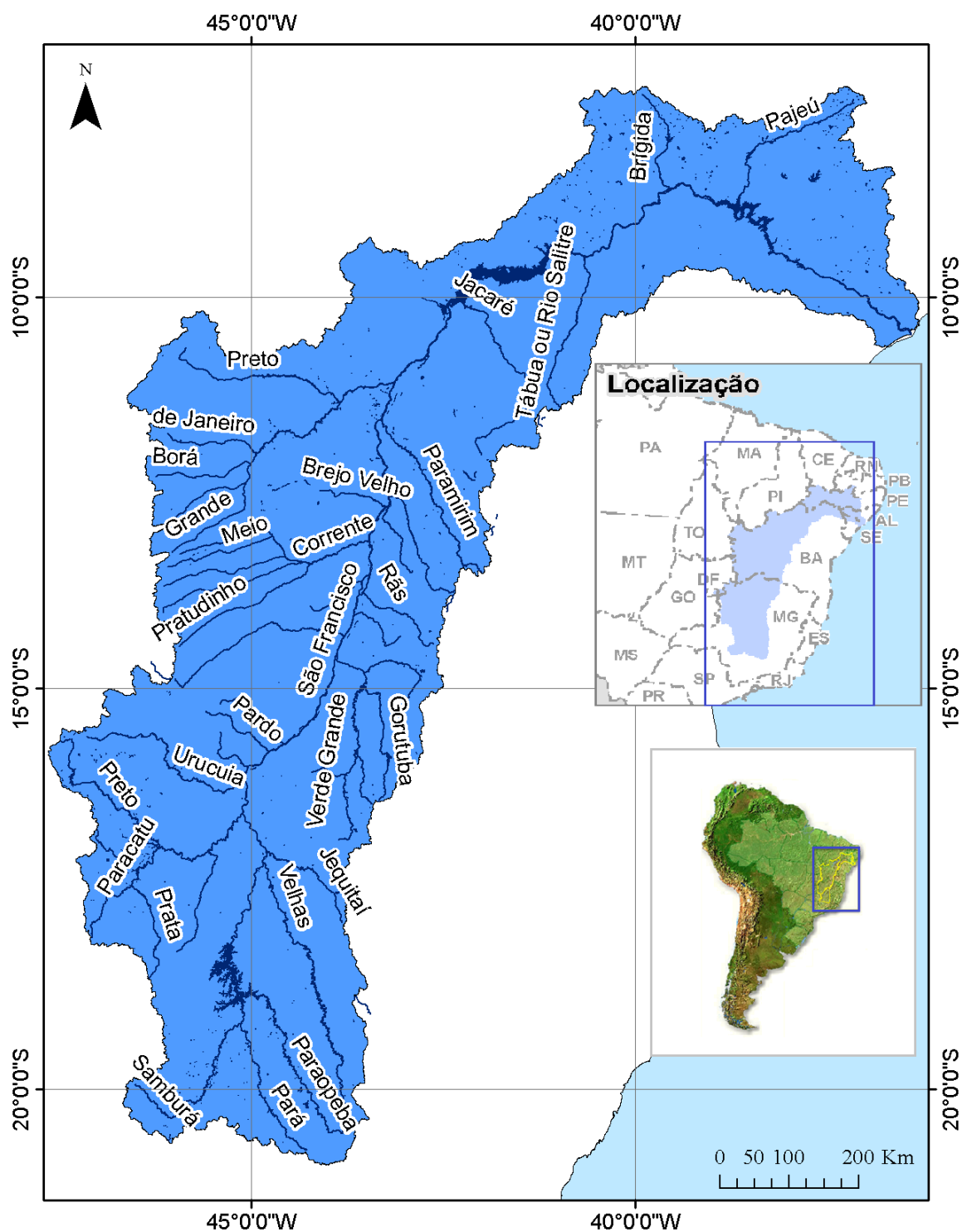
A bacia hidrográfica do rio São Francisco contempla paradoxos socioeconômicos e grande vulnerabilidade ambiental, abrangendo áreas de acentuada riqueza e alta densidade demográfica e áreas de pobreza crítica e baixa densidade demográfica (CBHSF, 2015). A nascente do rio está localizada a 1.428 m de altitude, no Chapadão da Zangaia, no município de São Roque, Minas Gerais, onde foi criado o Parque Nacional da Serra da Canastra no ano de 1972, para sua proteção. (FERNANDES, 2015).

Atualmente, a melhor forma de se descrever a bacia do rio São Francisco é focando em cada região que a abrange. O Alto São Francisco, que se estende por 1136 km, margeando a calha principal do rio, desde a nascente até o início cidade de Bom Jesus da Lapa/BA, compreende uma área de 253.291 km², ou seja, 39,8% da área total da bacia. Nesta nova divisão, o Alto passa a ter tanto o maior trecho de calha principal do rio São Francisco quanto a maior área da bacia, compreendida por áreas do Distrito Federal (0.5%), Goiás (1.2%), Bahia (5.6%) e Minas Gerais (92.6%).

O Médio São Francisco é o segundo maior trecho em extensão, com 842.26 km compreendidos entre as cidades de Bom Jesus da Lapa (BA) e Remanso (BA). Localizado às

margens do reservatório de Sobradinho, esse trecho corresponde a uma área de 247.518 km², ou 38.9% da área da Bacia. (FERNANDES, 2015).

Figura 3.1. Localização da bacia hidrográfica do rio São Francisco



Fonte: (CBHSF, 2016; MMAa, 2016 - Modificado)

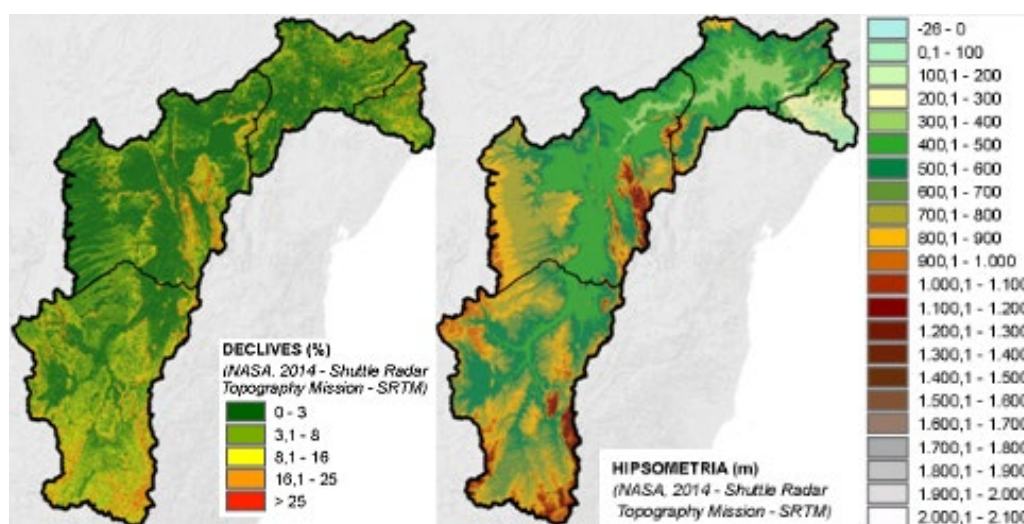
O Submédio São Francisco está localizado entre Remanso (BA) e Jatobá (BA) e tem 455.92 km de extensão, sendo parcialmente navegável. Abrange áreas dos estados da Bahia e Pernambuco, e apresenta uma área de 105.540 km² (16.6%). Por fim, Baixo São Francisco compreende a região que se estende por 278.05 km de extensão, de Paulo Afonso à foz no Oceano Atlântico, onde faz a divisa entre os municípios de Piaçabuçu (AL) e Brejo Grande (SE), compreendendo uma área de 29.866.5 km², ou 4,7% da área da Bacia.

3.1.1. Relevo e Geologia

Conforme FERNANDES (2015), o vale do São Francisco equivale a uma depressão alongada que parte do extremo sul, na Serra da Canastra, margeado pelas Serra do Espinhaço a leste e Serra Geral de Goiás a oeste, com altitudes variando de 1.000 a 1.300 metros do nível do mar. No final do Médio São Francisco, o curso d'água encontra-se com a Serra da Tabatinga, ao norte, cujas alturas são de 800 a 1.000 metros, sendo divisor com o vale do Parnaíba, no Piauí. Nesse ponto, o vale do São Francisco toma a direção leste, sendo margeado ao norte pela chapada do Araripe, divisor de águas com o vale do Cariri no Ceará e ao sul limitado pelas Bacias de Tucano e Vaza-Barris, divisores de águas com o raso da Catarina na Bahia. Na região do baixo, o rio São Francisco segue até a sua foz tendo seus divisores de águas com as bacias do rio Japarutuba, em Sergipe, ao sul e do rio Coruripe em Alagoas, ao norte.

FERNANDES (2015) acrescenta ainda que na região dos divisores de águas das nascentes, onde as altitudes variam de 1.600 a 900 metros, o Alto São Francisco apresenta uma topografia levemente ondulada, entalhada em arenitos, ardósias e calcário. (Figura 3.2 e 3.3).

Figura 3.2. Distribuições das Declividades e Hipsometria da bacia do São Francisco



Fonte: (CBHSF, 2016)- Modificado.

No Médio São Francisco, próximo aos limites de Goiás até a divisa do Maranhão e Piauí, os chapadões constituem as feições predominantes, com vertentes sulcadas por vales profundos. As altitudes situam-se entre 800 a 900 metros. No Baixo São Francisco, perto da foz e do nível de base, o rio perde velocidade e dá origem a depósitos sedimentares. De acordo com Medeiros (2003), na geomorfologia do Baixo São Francisco, destacam-se a planície costeira com altitude inferior a 100m e os tabuleiros costeiros da Formação Barreiras com altitudes de 100m a 200m.

De forma geral, a geologia da bacia do São Francisco pode ser dividida em terrenos cristalinos e sedimentares. Nessa divisão, os terrenos sedimentares incluem as bacias sedimentares, coberturas detrítico-lateríticas, depósitos colúvio-eluviais e aluviões. Os terrenos cristalinos equivalem à aproximadamente 57% da área da bacia do São Francisco, e os terrenos sedimentares representam cerca de 43% (MEDEIROS, 2003), tal como pode ser observado na Figura 3.4.

Os terrenos sedimentares, em geral, possuem boa capacidade de armazenamento e infiltração de água no solo, reduzindo assim as vazões nas calhas dos cursos de água devido à boa permeabilidade e porosidade das rochas. Em contrapartida, os terrenos cristalinos, possuem pouca capacidade de acumulação e promovem uma rápida saturação e escoamento superficial, favorecendo assim a vazões maiores (Figura 3.5).

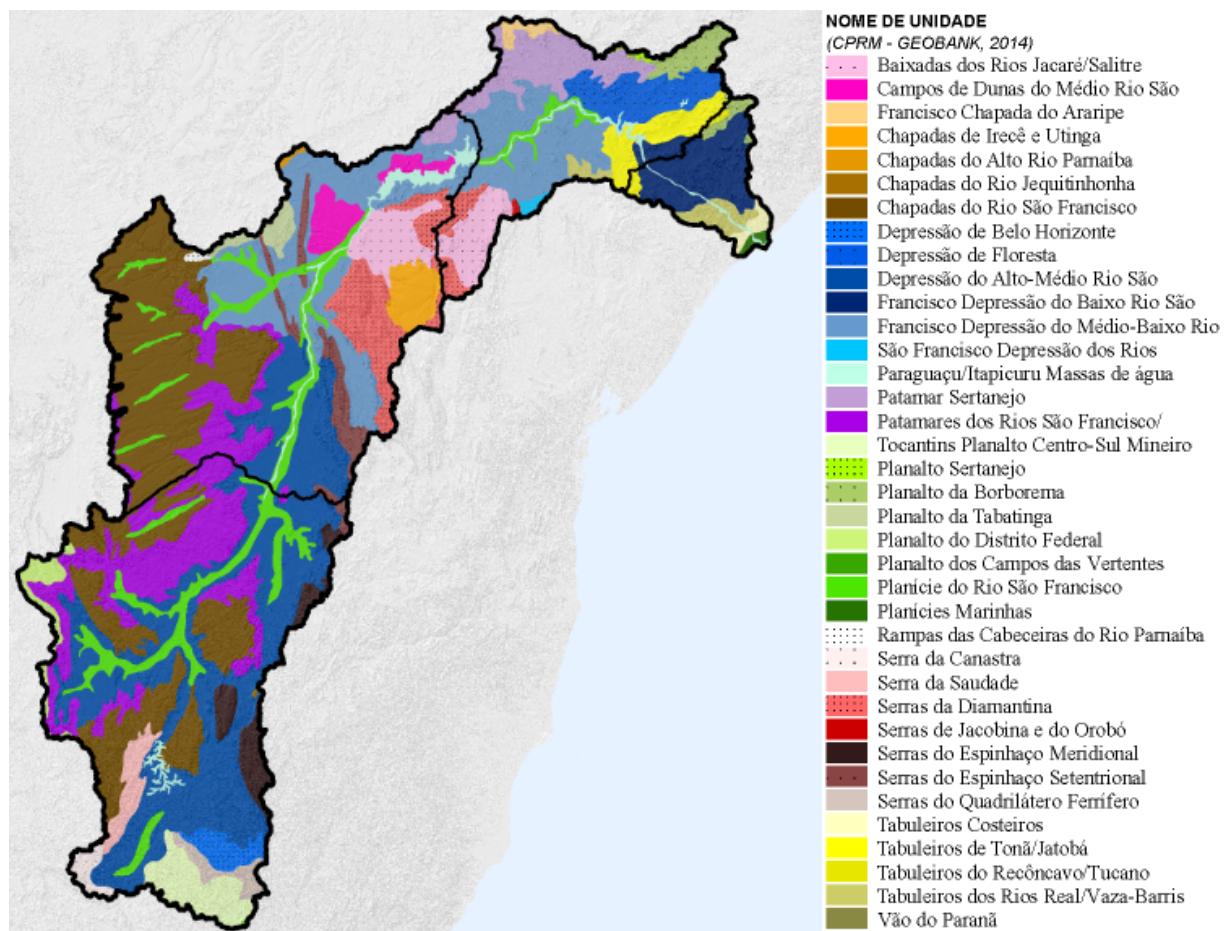
Na região do Alto São Francisco, predominam os afloramentos sedimentares da Formação Serra de Santa Helena, constituídos por argilitos, com lentes de calcários oolíticos, pretos e níveis de margas. A formação é de idade Neoproterozóica e pertence ao Grupo Bambuí. Na porção sul/sudeste da área afloram as rochas mais antigas do Meso e Neoarqueano. São Rochas Metamórficas (gnaisses, migmatitos, metapelitos) e Rochas Ígneas (granitos e granodioritos). Além das Rochas Paleoproterozoicas dos Grupos Canastra Indiviso.

A região do Médio São Francisco tem na maioria do seu terreno afloramentos de rochas sedimentares de idade Mesozoica do Grupo Urucuia, que são constituídos por arenitos de granulometria variada e coloração variegada, além de conglomerados (FERNANDES, 1982). Quanto à deposição, são classificados como ambientes fluviais e eólicos (LIMA e LEITE, 1978; FERNANDES, 1982). Na literatura, o Grupo Urucuia está subdividido em duas formações, Posse e Serra das Araras.

Os arenitos do Grupo Urucuia na Região Oeste da Bahia e Norte de Minas Gerais geralmente aparecem sobrepostos às rochas Neoproterozoicas do Grupo Bambuí, que são

compostos por rochas siliciclásticas e carbonáticas pouco deformadas. As rochas são compostas por folhelhos, argilitos, arcóseos, margas, dolomitos e calcários. O Grupo Bambuí é dividido em seis formações, da base para o topo: Formação Jequié, Sete Lagoas, Serra de Santa Helena, Lagoa do Jacaré, Serra da Saudade e Três Marias. No Oeste Baiano, o Grupo Bambuí sofre uma reclassificação, porém as três são correlatas respectivamente às formações Lagoa do Jacaré, Serra de Santa Helena e Três Marias. As rochas mais antigas são datadas do Eon Arqueano aflorando no leste da bacia e as rochas metamórficas do Complexo Parnamirim.

Figura 3.3. Distribuições Unidades Fisiográficas da bacia do São Francisco

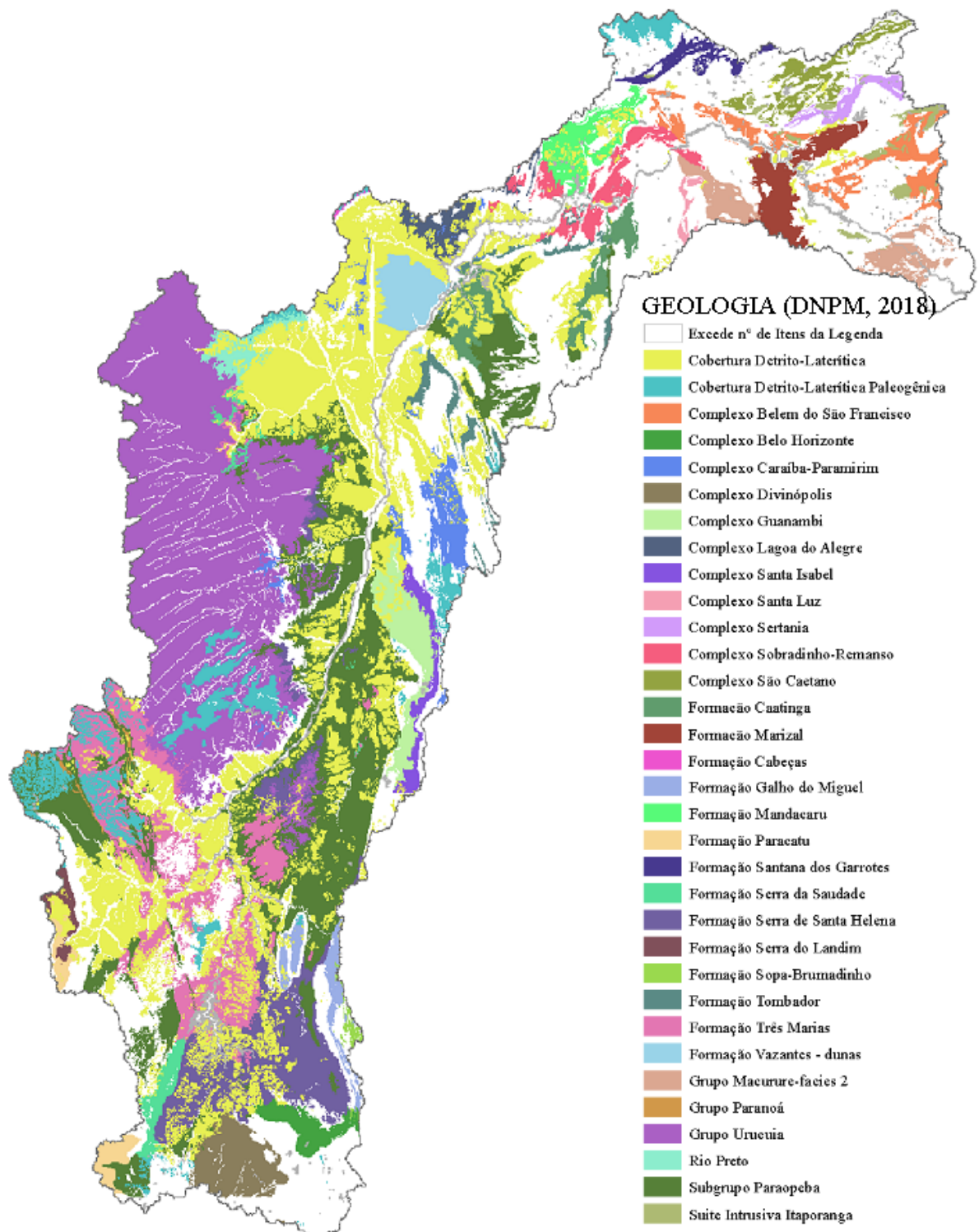


Fonte: (CBHSF, 2016)- Modificado.

As rochas mais antigas na área do Submédio São Francisco são do Eon Arqueano e são praticamente Rochas Metamórficas. Segundo Brasil (1974) nas áreas do cristalino há o predomínio de gnaisses, granitos, migmatitos e xistos. O embasamento cristalino é recoberto por sedimentos arenosos das bacias do Araripe, Tucano e Jatobá. A sedimentação recente é

constituída por aglomerados, areia, laterita e argila, e estão assentados na Bacia sedimentar do Tucano-Jatobá.

Figura 3.4. Distribuição Geologia Aflorante da bacia do São Francisco



Fonte: (CBHSF, 2016)- Modificado.

A região do Baixo São Francisco encontra-se inserida na província estrutural da Borborema, que é formada por rochas metamórficas oriundas das colisões das placas tectônicas, ocorridas durante o ciclo Brasileiro e que foi acrescido de materiais de sequências de empurrões de origem pós-orogênicas.

Toda a sedimentação da sub-bacia foi dada nos períodos jurássico e cretáceo, também ocorreram intrusões magmáticas e, por fim, a sedimentação de material terciário e quaternário em locais restritos da sub-bacia. Por outro lado, a extensão ocupada pelas reservas minerais e a diversidade da riqueza da bacia é muito grande, como se pode observar a partir da Figura 3.6.

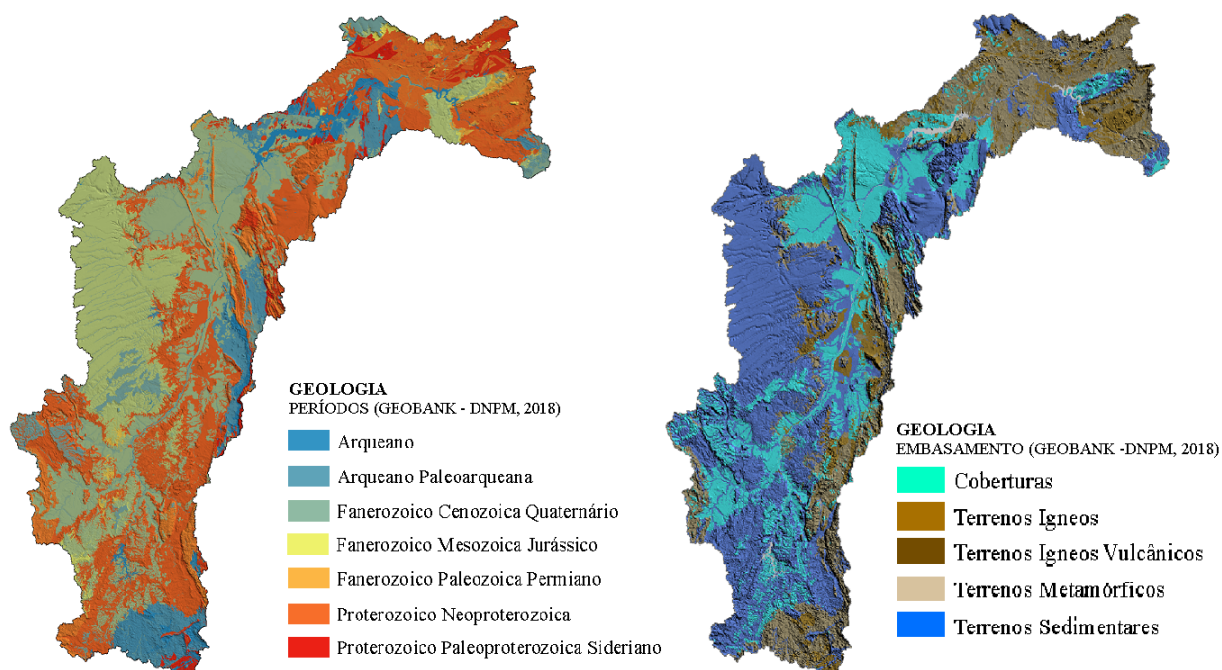
Na Região do Alto São Francisco destaca-se o município de Ouro Preto, com a produção de topázio e diamante, em sua maioria por meio de garimpos. A região nordeste do estado é conhecida como uma das regiões mais gemíferas do mundo (DELANEY, 1996). Quase metade, das minas de pedras preciosas existentes no país, está localizada no nordeste do estado de Minas Gerais. No médio São Francisco a maior ocorrência de gemas fica por conta do estado da Bahia, com ocorrências de diamante, quartzo, esmeralda, ágata, turmalina e turquesa. Na área do Submédio São Francisco, as maiores ocorrências de gemas na região estão nos estados de Pernambuco e Bahia, sendo que a grande maioria está localizada no estado baiano, onde as principais gemas exploradas são: diamante, ametista, esmeralda, turmalina e quartzo. Na região do Baixo São Francisco as ocorrências de gemas ficam restritas aos estados de Pernambuco e Alagoas, nos municípios de Santana-AL e Pedra-PE, onde se explora a ametista, e Venturosa-PE, onde há a exploração de quartzo hialino, usado para confecção de joias e fabricação de chips osciladores para uso eletrônico, dentre outras funções. (DARDENNE e SCHOBENHAUS, 2001).

Além da riqueza em gemas, existem ainda as riquezas das reservas de minerais metálicos e não metálicos. Na região do Baixo São Francisco a principal ocorrência é o ouro mineralizado, geralmente nas rochas cristalinas que são pertencentes à Província da Borborema. No Submédio há ocorrência de ouro, além de grandes depósitos de cromo e cobre (DARDENNE e SCHOBENHAUS, 2001).

A região do Médio possui reservas de Ferro-Titânio-Vanádio, que ocorrem em morros alongados na direção N-S, os corpos dos minérios são lenticulares e a rocha hospedeira são metagabros e metanortositos e reservas de Tálcio (do grupo das “terras raras”), associadas à Manganês e Cobalto. O ouro no Médio São Francisco ocorre geralmente em veios de quartzo

encaixados em rochas vulcânicas. A região do Alto São Francisco abrange Minas Gerais, o maior produtor de ouro do país, e a grande produção é registrada em forma de jazidas e aluviões (rios), assim com também o é para a produção de ferro.

Figura 3.5. Distribuição dos Períodos Geológicos e Tipos de Embasamento da bacia do São Francisco

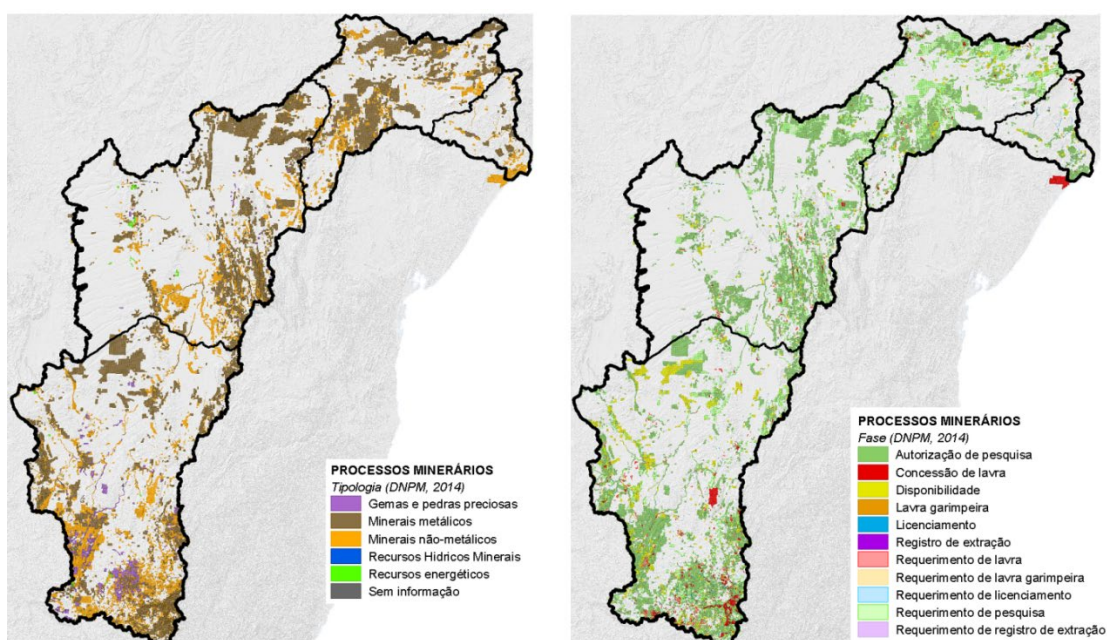


Fonte: (CBHSF, 2016)- Modificado.

Quanto aos minerais não-metálicos, estes são tanto no volume quanto no valor de produção, quase da mesma importância que os minerais. Segundo o DNPM, no ano de 2010 o valor da produção de mineral não-metálico chegou a R\$ 15.974.472.609, somando toda substância bruta e beneficiada. Os minerais não-metálicos podem ser divididos em algumas classes: materiais de construção civil; minerais industriais e matéria prima para fertilizante para uso na agricultura.

Na bacia hidrográfica do rio São Francisco, há também a presença de minerais orgânicos fósseis, utilizados para fins energéticos. No submédio São Francisco, nos estados da Bahia e Minas Gerais ocorrem linhito, turfa, folhelho betuminoso e urânio (recurso energético nuclear) que estão mineralizados em lentes de albititos. No Alto São Francisco há ocorrências de Turfa, Urânio e gás natural, armazenado nos calcários do Grupo Bambuí. A ocorrência de Urânio está associada ao metamorfismo, que está ligado geoquimicamente ao ouro, sendo sua rocha hospedeira o metaconglomerado.

Figura 3.6. Distribuição dos Recursos Minerários da bacia do São Francisco cadastrados no DNPM.



Fonte: (CBHSF, 2016)- Modificado.

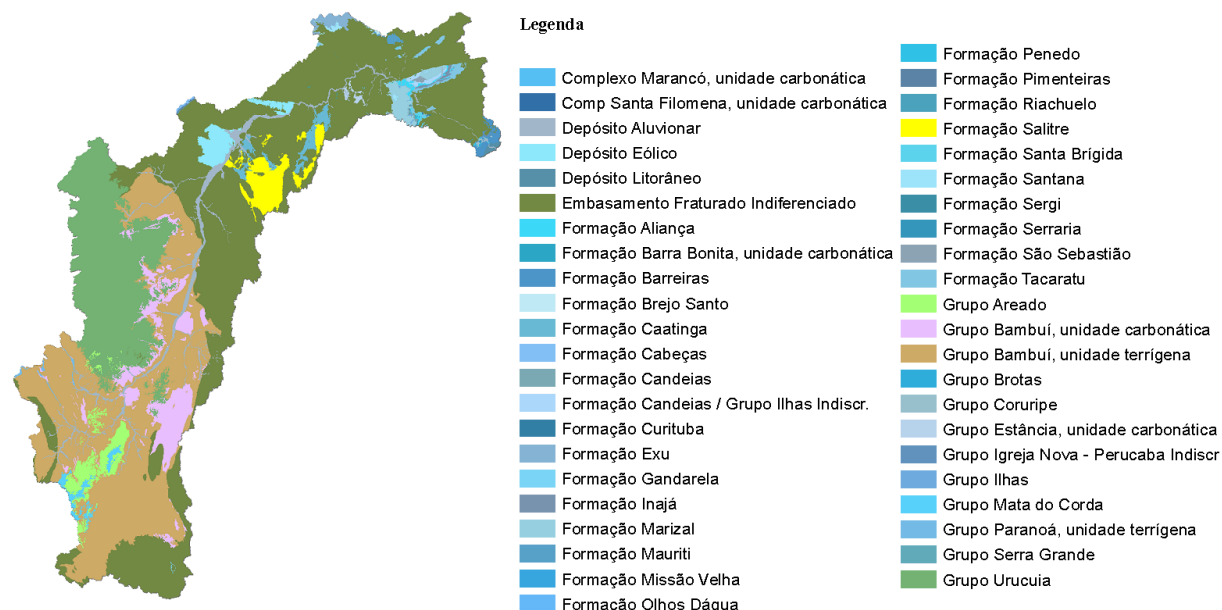
Em relação à hidrogeologia da Bacia do Rio São Francisco, quase 50% das rochas possui um grande potencial hidrogeológico, devido à grande diversidade dos seus terrenos. Esse potencial é evidente no Médio São Francisco, onde se encontram os maiores aquíferos da bacia. Existem vários aquíferos em toda a extensão da Bacia do Rio São Francisco, porém, os aquíferos Bambuí, Salitre e Urucuia são de grande importância para a bacia, visto sua grande extensão e capacidade. Os aquíferos na região do Alto também são bastante relevantes, mas não apresentam a extensão e capacidades dos do Médio (Figura, 3.7 e 3.8).

Na região do Baixo São Francisco, a maioria das rochas é pertencente à Província da Borborema. Estas são rochas metamórficas, que não possuem alto potencial hidrogeológico, tendo em vista que os possíveis aquíferos são fissurais e que a qualidade das águas geralmente não é satisfatória.

No litoral, a placa sedimentar arenítica Sergipe-Alagoas, que se apresenta dois terços submersa pelo oceano e uma faixa de aproximadamente 40 km emersa, onde há um bom potencial hidrogeológico, porém, este deve ser utilizado de modo profundamente racional devido à sua grande vulnerabilidade, uma vez que ocupa uma estreita faixa, sendo do tipo paralelo-litorâneo. Assim, uma superexploração poderá levar à ruptura do frágil equilíbrio existente entre água doce e água salgada, acarretando o processo de intrusão de água salgada por via subterrânea

e problemas não somente relacionados à qualidade das águas nos aquíferos, como também à salinização dos solos.

Figura 3.7. Carta Hidrogeológica da bacia do São Francisco.



Fonte: (DNPM, 2016).

O Submédio São Francisco também não possui grande potencial hidrogeológico, já que a maioria do seu território é composta por rochas metamórficas de baixo potencial de infiltração, condutividade e armazenamento, assim como em boa parte do Baixo São Francisco. A maioria da água utilizada vem de água superficial e de alguns poços perfurados nas fissuras dessas rochas metamórficas. Ademais, a região do Médio São Francisco é a região com maior potencial hidrogeológico, tendo em vista que os maiores aquíferos estão contidos em sua área.

O sistema aquífero Bambuí está inserido na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, incluindo parte dos estados da Bahia, Goiás, Minas Gerais e Tocantins. É um aquífero do tipo Cárstico/Fissural e está associado a rochas calcárias e metassedimentares. A média da vazão dos seus poços está em torno de 14 m³/h e a profundidade cerca de 85m. Em geral, suas águas são consideradas de boa qualidade, havendo restrições em algumas localidades devido ao alto teor de sólidos totais dissolvidos e da elevada dureza, causada pela dissolução das rochas calcárias.

O aquífero é dividido em duas partes: Zona Cárstica e Zona Cárstica/Fraturada. A zona cárstica apresenta águas bicarbonatadas cálcicas e/ou magnesianas, essa relação é dada pelo pH médio de 7,79. A dureza é bastante alta, com média de 219,7 mg/L, a alcalinidade tem valores médios de 210,4 mg/L e a condutividade elétrica tem média de 463 µS/cm. Esses valores são

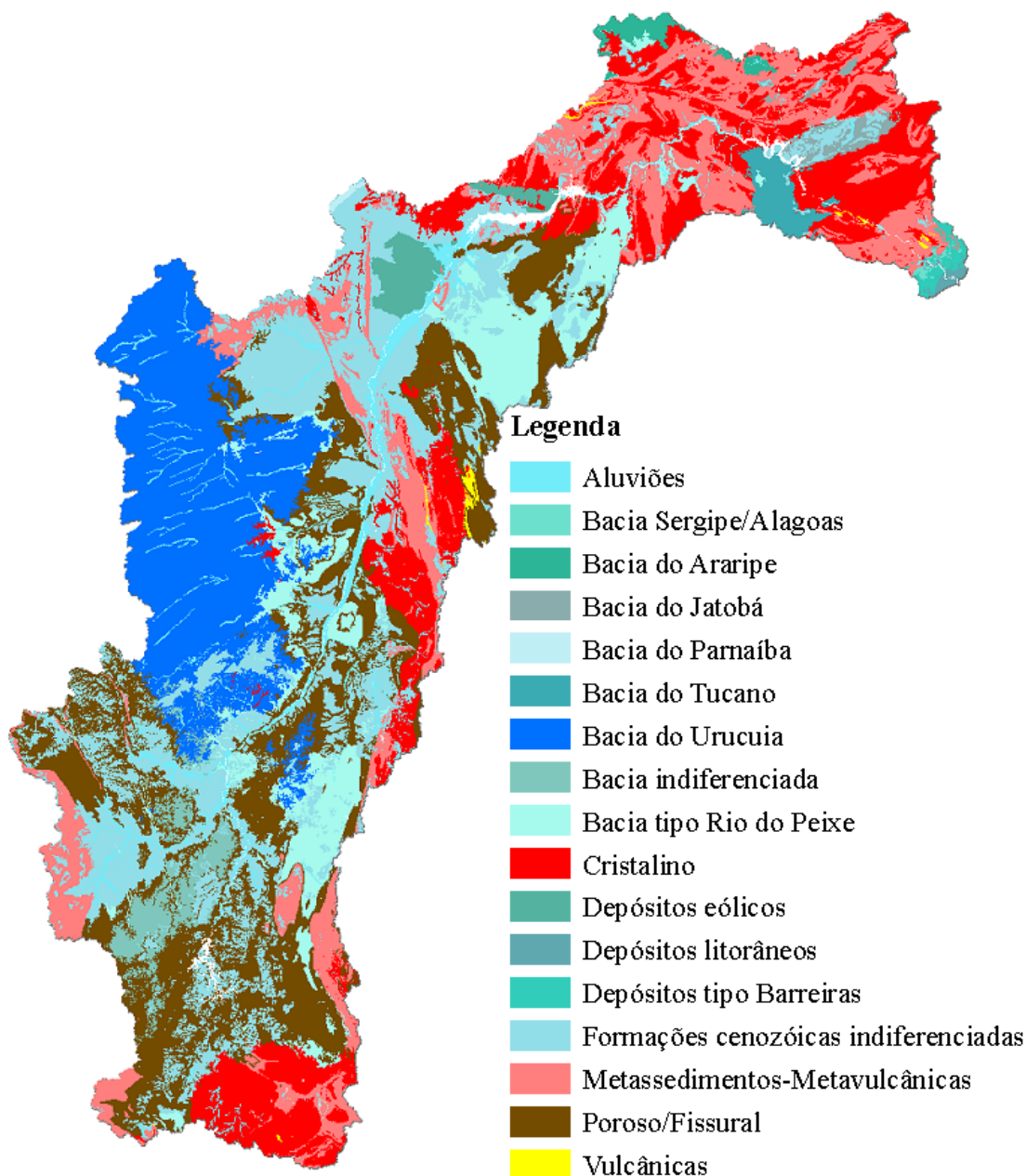
reflexo da interação das rochas calcárias com a água subterrânea. Na região cárstica-fraturada, as águas são bicarbonatadas magnesianas, bicarbonatadas sódicas e mistas, e menos mineralizadas, como indica a condutividade elétrica média de 427 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e o pH médio é de 8,00 (RAMOS e PAIXÃO, 2003).

Na Bahia, ocorre na porção oeste e apresenta-se da base para o topo com as formações São Desidério, Formação Serra da Mamona e Formação Riachão das Neves. Estando quase que totalmente recobertas pelas rochas siliciclásticas do Grupo Urucuia, ficando com uma pequena porção exposta nos arredores dos municípios de São Desidério e Catolândia. É alimentado pelas precipitações e por contribuições das águas dos arenitos do Grupo Urucuia. A região é cortada por importantes drenagens que abastecem o Rio São Francisco. Os rios apresentam comportamento de afluência e influência a depender da piezometria da área, em relação às cotas dos mesmos. Quanto aos fluxos subterrâneos, aparentemente são congruentes com aquelas das drenagens superficiais (ANDRADE e CASCAES, 1990).

O aquífero Bambuí, atualmente, tem profundidade de captação girando em torno de 80 m, atualmente. Em áreas onde a camada de cobertura recente é muito espessa, chega a alcançar até 100 m de profundidade, mas a grande maioria das entradas d'água situa-se entre 20 e 60 m. Exceções ocorrem já que não são raros, por exemplo, casos de poços em cotas topográficas baixas, com um nível estático quase aflorante, mas com entradas d'água principais abaixo de 100 m. No que diz respeito às vazões, apenas 15% dos poços ultrapassam 20 m^3/h . Ao norte da região, as vazões variam entre 5 m^3/h e 10 m^3/h e no município de Serra do Ramalho, na zona de contato Bambuí/Arqueano, são obtidos poços com as vazões menores. As águas da região são potáveis, pois apresentam um nível de resíduo total entre 300 mg/l e 600 mg/l e dureza entre 300 mg/l . As águas de melhores condições são as dos sopés da chapada do Urucuia e as da região ribeirinha do São Francisco. Em um contexto geral, as águas do Aquífero Bambuí são de melhor qualidade que as águas do aquífero Salitre, porém, as vazões são bem menores devido à menor intensidade de carstificação.

Tendo em vista esse potencial subterrâneo no oeste baiano, devido ao armazenamento de água nos calcários do Grupo Bambuí, todos os municípios se utilizam das águas do Aquífero Bambuí para abastecimento urbano onde, em alguns casos, é necessário utilizar dessalinizadores, e, devido ao grande teor de cálcio, ocorrem muitos problemas de saúde pública. Nas regiões que possuem irrigação e não contam com as águas do Aquífero Urucuia, as águas do Aquífero Bambuí suprem a necessidade dos agricultores.

Figura 3.8. Carta Domínios Hidrogeológicos da bacia do São Francisco.



Fonte: (DNPM, 2016).

No norte de Minas Gerais, mais precisamente no município de Jaíba, há um aquífero cárstico chamado informalmente de “Aquífero Jaíba”. A região de Jaíba tem elevado potencial de água subterrânea para irrigação através dos poços que chegam a produzir até 100 m³/h (SILVA *et al*, 1981). A respeito da hidrogeologia das sub-bacias hidrográficas, a exemplo da do rio Verde Grande, são de suma importância as rochas carbonáticas do Grupo Bambuí e as porosas do Grupo Urucuia. As rochas de características porosas ocupam 29% da sub-bacia e englobam aluviões recentes, coberturas detriticas, coberturas detriticaslateriticas, colúvios e os arenitos do

Grupo Urucuia. O domínio cárstico-fissural inclui as rochas carbonáticas, predominantemente os calcários e as pelito-carbonáticas, pertencentes ao Grupo Bambuí. Essas litologias se distribuem pelas porções centro e ocidental da bacia do Rio Verde Grande, onde estão os melhores sistemas aquíferos da bacia, especialmente aqueles em que predominam as rochas carbonatadas.

Na Bahia encontra-se outro importante aquífero, do grupo Salitre, que fica localizado na região centro-norte do Médio São Francisco, mais precisamente na Sub-Bacia do Irecê. Segundo Ramos *et al.* (2007), a região de Irecê apresenta intensa carstificação e, assim como todas as grandes áreas cársticas do mundo, não possui grandes corpos de águas superficiais, sendo a água subterrânea a mais importante fonte para o abastecimento da região. Dois domínios estruturais cársticos estão vinculados a fases de deformação brasileira (RAMOS *et al.*, 2007). Um desses domínios está localizado na porção sul da sub-bacia de Irecê, fazendo contato na parte leste e oeste com as rochas do Grupo Chapada Diamantina. Trata-se de rochas carbonáticas levemente onduladas, com estratificação plano paralelas, dobramentos amplos com eixo N-S e lineamento estrutural associado à transcorrência de direção N-S. Nesse domínio, há uma grande quantidade de dolinas de formato arredondado com diâmetro chegando a 200 m.

O outro domínio estrutural encontra-se na região central da sub-bacia de Irecê, caracterizado pela presença de intensos cavalgamentos, com dobramentos e falhamentos de baixo ângulo associados, e vergência para SSE (GUERRA, 1986; BASTOS LEAL *et al.*, 2004; RAMOS, 2003). O aquífero é do tipo cárstico-fissural, com presença de dolinas de pequeno porte, com diâmetro chegando a no máximo 15 m, alinhadas seguindo a direção dos lineamentos estruturais E-W, além da presença de sumidouros, que servem como recarga para o aquífero, com ocorrência de solos muito rasos a inexistentes. Ramos *et al.* (2007) observaram que dos poços estudados, os com maiores vazões estão próximos aos grandes lineamentos estruturais, as zonas de descarga do aquífero e dos contatos com as Rochas do Grupo Chapada Diamantina nas bordas leste e oeste do aquífero.

O último Sistema Aquífero de grande importância a ser apresentado é o do Urucuia, que é uma junção de aquíferos nos arenitos do Grupo Urucuia, que abrange a Sub-Bacia Urucuia, parte setentrional da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, uma cobertura Fanerozoica do Cráton de São Francisco. O aquífero Urucuia é um sistema do tipo intergranular, no formato de um grande tabuleiro, composto por arenitos quartzosos e arenitos feldspáticos, de ambiente sedimentar flúvio-eólicos bem selecionados, com níveis conglomeráticos e níveis apresentando muita silicificação.

Geralmente está sobreposto às rochas calcárias do Grupo Bambuí, nos estados da Bahia, Goiás e Minas Gerais. Na porção norte da bacia, encontra-se depositado sobre rochas sedimentares da Bacia do Parnaíba e sobre o embasamento cristalino que compõem os sistemas aquíferos Poti-Piauí/Serra Grande/Cabeças e Cristalino (CAMPOS & DARDENNE, 1997).

De modo geral, é basicamente idêntica às rochas do Grupo Urucuia na Bacia do Rio São Francisco, correspondendo todas as rochas siliciclásticas ao norte do Rio Carinhonha, tendo em vista que, ao sul, essas rochas são mais dispersas. Esse montante chega a uma área de aproximadamente 86.000 km², porém, a área efetiva do Aquífero é de aproximadamente 76.000 km² (GASPAR, 2007). O aquífero se estende do sul do Piauí até o noroeste de Minas Gerais, onde sua maior área de abrangência é o oeste do estado da Bahia. Uma parte das rochas do Grupo Urucuia se estende para a região do Alto São Francisco, porém não faz parte da área efetiva do aquífero. A área total de recarga do aquífero Urucuia é de 55.000 km² e foi delimitada por Gaspar (2006) através de imagens de Radar e dados digitais de terreno. Nessas áreas encontram-se as grandes regiões agricultáveis.

Nos poços perfurados, nas áreas não efetivas do aquífero, são exploradas águas de outros aquíferos, como o Sistema Aquífero Fissuro-Cárstico Bambuí e os Aquíferos cristalinos. Os arenitos nestas áreas funcionam como uma zona de aeração, agindo como uma espécie de filtro para os sistemas aquíferos sobrepostos. Isso fica bem evidente nos poços entre as sedes municipais de São Desidério e Correntina (GASPAR, 2006). A autora estudou os poços do cadastro da CERB e observou que a espessura do arenito chegava até 50 m, porém as entradas de águas eram todas nos Calcários do Grupo Bambuí, logo os arenitos do Grupo Urucuia estão servindo como ponto de recarga dos aquíferos em questão.

A porção oeste da área efetiva do aquífero Urucuia apresenta um eixo divisor norte-sul que divide o fluxo subterrâneo para oeste e leste. Esse eixo divisor foi definido através de sondagens elétricas verticais e polarização elétrica induzida, por Amorim Jr. (2003) e Amorim Jr. e Lima (2003). Esse eixo divide a bacia hidrológica em duas bacias hidrogeológicas. Logo, a bacia hidrogeológica leste contribui para drenagem da Bacia Sanfranciscana e a bacia hidrogeológica oeste para a Bacia do Rio Tocantins. A recarga nas áreas próximas ao eixo alimenta as duas bacias hidrogeológicas (GASPAR, 2006).

Na região do Alto São Francisco cerca de 80% a 90% do potencial hidrogeológico está nas rochas de domínio fraturado, com rochas do embasamento fraturado do Grupo Bambuí, da

parte terrígena e as rochas do Grupo Mata da Corda. O domínio Cárstico é responsável por aproximadamente 6% da região, composta pela Formação Gandarela e rochas carbonáticas do Grupo Bambuí. E, por fim, o Domínio Granular, composto por rochas do Grupo Areado e depósitos aluvionares.

3.1.2. Solos e Irrigação

De modo geral, o uso do solo na bacia é dominado atualmente por agricultura (46%) e pastagens (43%). A agricultura é principalmente voltada à produção de soja e feijão, com outras culturas extensivas, consistindo de milho e algodão (muitas vezes as culturas são alternadas entre soja e milho, com duas colheitas por ano). Uma parcela menor da área inclui a fruticultura. Os solos na bacia são latossolos, geralmente muito férteis (41% da bacia), podzols (11% da bacia), neossolos quartzerênicos, menos férteis (10%) e cambissolos (7%) (CREECH *et al.*, 2015).

Tabela 3.1. Principais Atividades de Irrigação na bacia do São Francisco

Nome	Coordenadas		Origem	Tipo Origem	Tipo Retirada	Fluxo m ³ .h ⁻¹
	Lat. S	Long. O				
Lagoa Grande	15°44'55"	43°18'36"	Gorotuba	Reservatório	Bombeamento	8.740
Gorotuba	15°49'55"	43°15'46"	Gorotuba	Reservatório	Gravidade	8.762
Pirapora	17°14'56"	44°51'14"	São Francisco	Rio	Bombeamento	3.750
Jaíba	15°05'24"	44°05'24"	São Francisco	Rio	Bombeamento	53.529
Barreiras do Norte	12°04'48"	44°57'59"	Grande	Rio	Bombeamento	12.642
Ceraíma	14°17'23"	42°44'8"	Carnaíba de dentro	Reservatório	Gravidade	539
Estreito	14°49'35"	42°48'27"	Verde Pequeno	Reservatório	Gravidade	4669
Formoso A	13°11'7"	43°38'37"	Corrente	Rio	Bombeamento	47160
Míroros	11°27'34"	42°20'34"	Verde	Reservatório	Bombeamento	3119
Nupeba	11°48'35"	44°43'0"	Grande	Rio	Bombeamento	14196
Piloto Formoso	13°36'16"	44°23'45"	Formoso	Rio	Bombeamento	1620
Riacho Grande	11°55'28"	44°50'48"	Grande	Rio	Bombeamento	8042
São Desidério	12°21'38"	44°58'20"	São Desidério	Reservatório	Gravidade	4700
Bebedouro	9°22'45"	40°26'38"	São Francisco	Rio	Bombeamento	13320

Nilo Coelho	9°25'37"	40°49'21"	São Francisco	Rio	Bombeamento	83520
Betume	10°25'4"	36°33'34"	São Francisco	Rio	Bombeamento	7167
Cotinguiba-Pindoba	10°16'30"	36°46'55"	São Francisco	Rio	Bombeamento	6939
Propriá	10°12'19"	36°50'4"	São Francisco	Rio	Bombeamento	5775
Boacica	10°14'04"	36°38'25"	São Francisco	Rio	Bombeamento	9345
Itiúba	10°13'13"	36°47'53"	São Francisco	Rio	Bombeamento	3373
Marituba	10°23'38"	36°33'8"	São Francisco	Rio	Bombeamento	4817
Curaçá	9°3'44"	40°2'52"	São Francisco	Rio	Bombeamento	19675
Mandacaru	9°23'3"	40°26'32"	São Francisco	Rio	Bombeamento	5200
Maniçoba	9°17'35"	40°18'57"	São Francisco	Rio	Bombeamento	23160
Salitre 1	9°28'53"	40°37'37"	São Francisco	Rio	Bombeamento	25200
Tourão	9°24'27"	40°27'31"	São Francisco	Rio	Bombeamento	47736

Fonte: Creechet *al.* (2015).

A bacia possui 64 milhões de hectares, dos quais 25,6 milhões são aproveitáveis em agricultura. Desse total, estima-se que a bacia possui mais de 300 mil hectares de lavouras irrigadas, o que representa apenas 10% do potencial de áreas aptas para a irrigação, contudo, esses números estão em processo de expansão devido à implantação de novas áreas irrigadas e a ampliação de muitas já existentes. Mais de 72% da área irrigada implantada faz parte da iniciativa privada, incluindo-se aí grandes e médios investidores, o restante, são perímetros públicos irrigados (Ramos, 2003).

Há um total de 26 grandes fontes de irrigação identificadas pela CODEVASF (Tabela 3.1), contudo, os dados de operação e fluxo reais não estão disponíveis. Estima-se que cada fonte de irrigação opere com capacidade de aproximadamente 25% durante a estação seca, ou seja, meses de abril a novembro (CREECH *et al.*, 2015).

3.1.3. Hidrografia

O rio São Francisco é composto por 168 afluentes, entre rios, riachos, ribeirões, córregos, e veredas, sendo que 99 são perenes e 69 intermitentes. O São Francisco possui 36 tributários principais dos quais 19 são perenes. Com um volume armazenado de 64,4 bilhões de m³ s⁻¹, o rio responde por 69% das águas superficiais do Nordeste. O Alto São Francisco demanda 90% da

vazão retirada da bacia para uso industrial, dada a magnitude e diversidade do setor na região metropolitana de Belo Horizonte. A indústria e mineração consomem 5% da vazão total retirada na bacia, o abastecimento urbano consome outros 7%. (CBHSF, 2015 p.281, p.286).

A irrigação apresenta forte consumo hídrico representando 77% da vazão total retirada. Em termo de volumes outorgados, a irrigação é a maior consumidora geral com 556,6 dos 723,4 $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ da vazão máxima outorgada na bacia (CBHSF, 2015 p.281, p.286). Além disso, o São Francisco nos últimos anos tem passado por intensas transformações com a realização do projeto de transposição e integração de bacias hidrográficas do nordeste setentrional.

O projeto prevê a retirada de 26,4 $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ de água (1,4% da vazão da barragem de Sobradinho que é de 1.850 $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$) que será destinada ao consumo da população urbana de 390 municípios do Ceará, Pernambuco, Paraíba e Rio Grande do Norte através das bacias de Terra Nova, Brígida, Pajeú, Moxotó, Bacias do Agreste em Pernambuco, Jaguaribe, Metropolitanas no Ceará, Apodi, Piranhas-Açu no rio Grande do Norte, Paraíba e Piranhas na Paraíba. O Eixo Norte do projeto, que levará água para os sertões de Pernambuco, Paraíba, Ceará e Rio Grande do Norte, e terá 400 km de extensão alimentando quatro rios e três sub-bacias do São Francisco (Brígida, Terra Nova e Pajeú) e mais dois açudes: Entre Montes e Chapéu.

O Eixo Leste abastecerá parte do sertão e as regiões do agreste de Pernambuco e da Paraíba com 220 km aproximadamente até o rio Paraíba, depois de passar nas bacias do Pajeú, Moxotó e da região agreste de Pernambuco. Ambos os eixos serão construídos para uma capacidade máxima de vazão de 99 $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ e 28 $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ respectivamente sendo que, trabalharão com uma vazão contínua de 16,4 $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ no eixo norte e 10 $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ no eixo leste.

Outra questão associada às calhas dos rios são as hidrelétricas. A primeira usina hidrelétrica foi a de Angiquinho, em Delmiro Gouveia, Alagoas. Foram construídas várias barragens ao longo do rio São Francisco a partir da década de 50, com o intuito de gerar energia hidroelétrica. Segundo Oliveira (2003), o rio apresenta uma vazão média anual de 2.850 $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$, exibindo uma das maiores descargas líquidas do Brasil; contudo, o rendimento de sedimento por área é um dos menores, devido à construção de barragens em cascata.

Duas dentre as 10 maiores usinas hidrelétricas do Brasil (em MW) estão no São Francisco: Xingó e Paulo Afonso IV. O volume de água acumulado nos reservatórios do rio São Francisco é de aproximadamente 68 bilhões de m^3 , sendo Sobradinho responsável por cerca de 50% do volume total. As principais usinas hidrelétricas em operação no rio São Francisco são:

Três Marias, Sobradinho, Itaparica (Luiz Gonzaga), Moxotó (Apolônio Sales), Paulo Afonso I, II, III, IV e Xingó (em sequência montante para jusante). Dessas usinas, apenas Três Marias, Sobradinho e Itaparica possuem reservatórios de regularização. A bacia apresenta um potencial hidrelétrico da ordem de 22.606,12 MW, sendo que se encontra em operação, 10.733,99 MW, e nas fases de Projeto básico, 288,54 MW; Estudo de viabilidade 6.140,0 MW; Inventário 3.882,61 MW; Potencial reservado (Ind.) 866,98. Dessa forma, existe um potencial remanescente da ordem de 694,0 MW a serem instalados na bacia do São Francisco (SIPOT, 2014).

O rio São Francisco é o principal rio da região Nordeste, por conta da sua importância hídrica; contudo, vem sofrendo alterações no regime hidrossedimentológico, com a construção, operação e manutenção das hidroelétricas, gerando impactos ambientais significativos. Informações sobre os maiores reservatórios como volume, a área de superfície, e algumas informações sobre as suas vazões (Q) são apresentadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2.Principais Reservatórios da Bacia hidrográfica do São Francisco

Reservatório	Ano	Vol(10^4m^3)	Área(hm^2)	Q min.	Q max.
Três Marias	1962	2.100.000	104.000	500	3.000
Sobradinho	1979	3.410.000	422.000	1.500	3.500
Luiz Gonzaga	1988	1.070.000	83.000	1.800	4.000
Paulo Afonso	1979	120.000	10.000	1.800	4.000
Xingó	1994	380.000	6.000	1.800	4.000

Fonte: Creech *et al.* (2015)

É importante ressaltar que uma grande parte desses aproveitamentos em operação na bacia do rio São Francisco tem funções de múltiplos usos, ou seja, além da geração de energia, o reservatório tem outras funções como de abastecimento humano e industrial, regularização de vazões, melhoria da navegabilidade do rio, controle de cheias, irrigação, turismo, recreação, empreendimentos de pesca, etc.

De acordo com Coelho (2008), qualquer modificação ocasionada no curso de um rio, a exemplo da construção de uma barragem, resulta em uma mudança significativa no seu regime hidrológico, sobretudo em seu segmento a jusante. As barragens modificam a forma do canal e a capacidade de transporte, causando aumento no fornecimento de sedimentos para o reservatório e

consequente assoreamento, em virtude da mudança da água corrente (lótica) para água parada (lêntica). A jusante dessas barragens acontece a erosão marginal, em decorrência da vazão regularizada e consequente deposição de sedimentos (assoreamento).

Mesmo assim, o Banco Mundial (2013), afirma que fazer do vale do rio São Francisco um corredor, de fato se apresenta como uma alternativa relevante para o desenvolvimento do país, pois reúne todas as condições para se tornar uma das mais importantes rotas logísticas de integração, notadamente da região nordeste para as demais. Salienta-se no citado estudo tanto o escoamento da crescente produção agrícola e mineral do oeste baiano, quanto o abastecimento dos espaços interiores do nordeste setentrional, com insumos críticos para seu crescimento econômico-social.

Respondendo a isto, o governo brasileiro conta com vários projetos prevendo a ampliação e interligação do sistema de transporte na bacia abrangendo os modais, ferroviário e rodoviário e apresentando o modal hidroviário como propulsor regional. O Ministério dos Transportes (MT, 2013), lançou o Plano Hidroviário Estratégico (PHE) almejando desenvolver o potencial de navegação interior, adormecido no país com o maior sistema fluvial mundial. De acordo com as diretrizes da Política Nacional de Transporte Hidroviário, o modal gera uma redução nos custos de 44% em relação ao ferroviário e de 84% frente ao rodoviário para cargas volumosas, tais como grãos, minérios e produtos florestais.

Dos seis sistemas hidroviários previstos no PHE, destaca-se justamente o do São Francisco. O plano indica a extensão do atual trecho entre Petrolina-PE e Ibotirama-BA a montante, seguindo de Ibotirama até Pirapora-MG. Com a região de MAPITOBA, o coração do Brasil - o Cerrado, como nova hinterlândia, aponta-se para um potencial de carga de cerca de 2,6 milhões de toneladas para o trecho Ibotirama-Pirapora em 2031 (MT, 2013).

Os investimentos listados perpassam desde derrocamentos e dragagens até sinalizações para melhorar a segurança e confiabilidade na navegação fluvial. Ademais, o PHE aponta para a necessidade de se avaliar a interação com o setor hidrelétrico, pois a navegação no trecho a partir de Pirapora depende da vazão da UHE de Três Marias. Por fim, menciona-se a necessidade de se requalificar diversos dos terminais hidroviários existentes mediante a construção de molhes, estradas internas e pavimentos, além de superestrutura como instalações de armazenamento, equipamentos de movimentação de carga e escritórios.

O sistema hidroviário do rio São Francisco abrange quatro hidrovias, quais sejam: a do rio São Francisco, do rio Corrente, do rio Grande e do rio Paracatu. Juntas detêm extensão de 2,5 mil quilômetros e atravessa, segundo o PHE (MT, 2013), o território de 105 municípios entre os estados de Minas Gerais, Bahia, Sergipe, Alagoas e Pernambuco. Estes municípios, em conjunto, apresentam população de 2,8 milhões de habitantes, segundo o censo demográfico de 2010. Entre os principais centros urbanos está a capital estadual Belo Horizonte, além de Contagem e Montes Claros em Minas Gerais, Petrolina em Pernambuco, Barreiras na Bahia e Arapiraca em Alagoas.

Atualmente, pelas hidrovias espalhadas pelo território nacional se transporta 13% da carga no Brasil, enquanto que o PNLT indica a intenção de o Governo Brasileiro aumentar até 2025 a participação para 29% do transporte total de carga no país. Na primeira edição do Programa Federal de Aceleração do Crescimento (PAC), que vigorou no período de 2007 a 2012, algumas hidrovias brasileiras já foram contempladas com ações específicas, dentre elas a Hidrovia do São Francisco.

3.1.4. Fitogeografia e Fauna

Um tema muitas vezes esquecido, mas de grande relevância, é relativo à manutenção da biodiversidade de uma bacia hidrográfica. Segundo o Comitê de Bacias Hidrográficas do São Francisco (CBHSF, 2015), o levantamento biótico permitiu identificar, até o momento, 1.194 taxa de flora e 1.701 taxa de fauna. No total, 155 espécies de flora e 140 espécies de fauna listadas apresentam estatuto de ameaça (nacional e/ou internacional), o que representa, respectivamente, aproximadamente 13% e 8% em relação do total identificado.

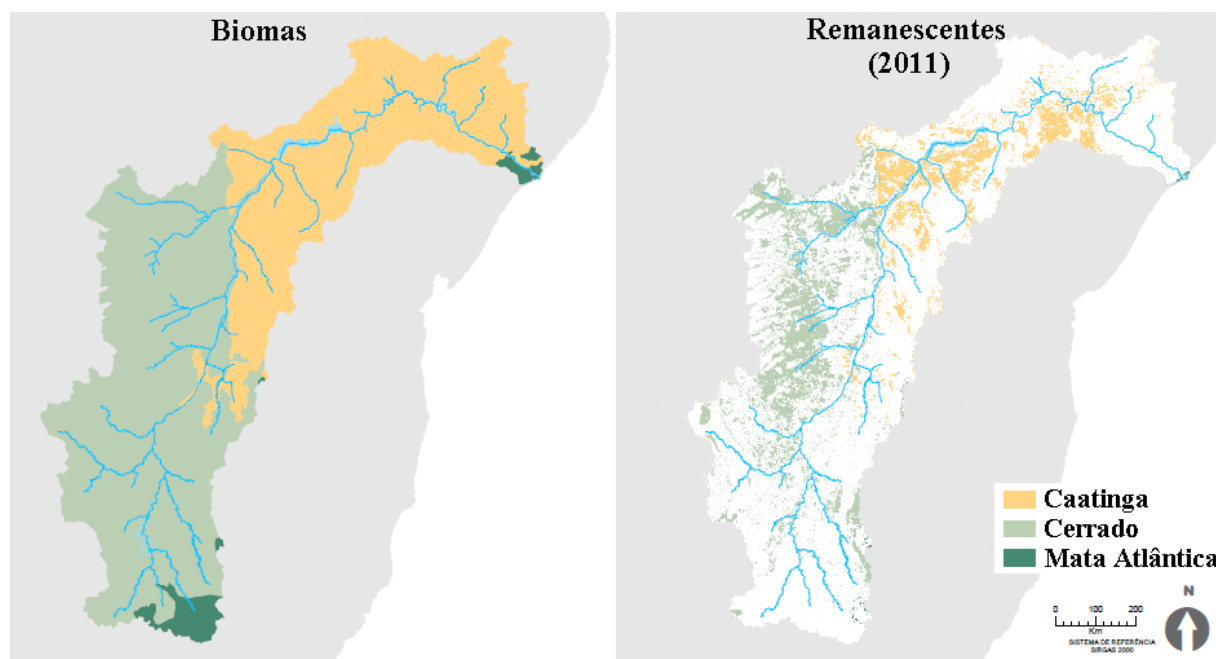
As ameaças relativas ao estado de conservação da fauna e flora da bacia estão associadas ao desmatamento de mais de 47% da área, principalmente na região do Médio São Francisco, seguindo-se as regiões do Alto, Submédio e Baixo São Francisco. Entre as áreas protegidas por lei, destacam-se as 125 Unidades de Conservação (UCs) existentes e destas, 56 designadas a partir de 2004. Ao todo se somam 69 UCs de proteção integral, cobrindo uma área menor que 1.9% da bacia.

A vegetação predominante na bacia do rio São Francisco é o cerrado (58.0%) e a caatinga (38.6%). Esses biomas apresentam características de áreas que possuem duas estações do ano bem definidas: uma chuvosa e uma seca. Na bacia também é possível observar a ocorrência da floresta tropical e da mata seca em menor proporção (3.4%) (GUIMARÃES e BRAGANÇA, 2003). (Figura 3.9).

Conforme se pode constatar na Figura 3.10, as áreas florestais vêm sendo devastadas quase que totalmente pelas pastagens, pelo uso agrícola e pela expansão urbana e industrial das cidades, aumentando a produção de sedimentos e intensificando os processos erosivos. A Mata Atlântica encontra-se em níveis extremamente críticos de destruição, contudo, ainda ocorrem fragmentos de florestas, pequenas matas de serra, mangues e vegetação litorânea (FERNANDES, 2015).

O Bioma do tipo Cerrado fez com que a *Conservation International* o incluísse na lista das 25 biodiversidades “*hotspot*” da Terra onde, embora dotados de riqueza biológica, estão sob ameaça de destruição. Myers *et al.*, (2000) registram a enorme abundância de espécies endêmicas, além de uma excepcional perda de habitat no cerrado brasileiro. Do ponto de vista da diversidade biológica, o Cerrado brasileiro é reconhecido como a savana mais rica do mundo. É o segundo Bioma brasileiro que mais sofreu alterações com a ocupação humana, depois da Mata Atlântica, e vem sendo degradado pela expansão da fronteira agrosilvopastoril e também pela exploração predatória de seu material lenhoso para produção de carvão. Os grandes remanescentes do Bioma, dentro e fora da BHSF, estão quase todos dentro de unidades de conservação, terras indígenas ou áreas onde o relevo é ruim para a agricultura. (MMAb, 2016).

Figura 3.9. Carta Biomas e seus remanescentes na bacia do São Francisco.



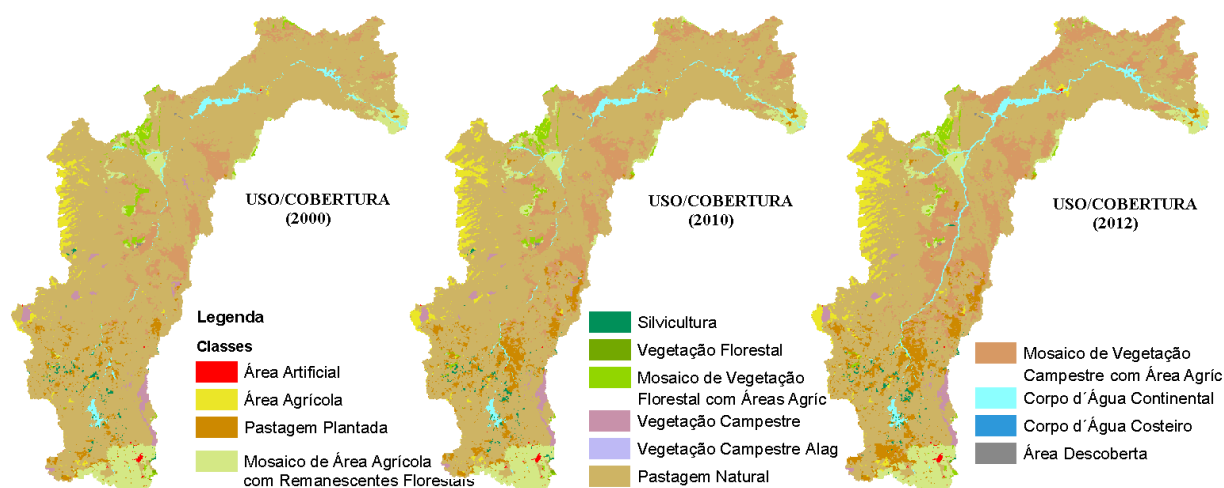
Fonte: (MMAa, 2016)

Na região fisiográfica do Alto São Francisco o desmatamento mais intenso registrado entre 2002 e 2011 ocorreu no Oeste, sobre Savana (Cerrado) Gramíneo-Lenhosa com Floresta de

Galeria e a Savana Parque com Floresta de Galeria e no centro, na região da Barragem de Três Marias se observa que sua porção centro-oeste e norte tiveram todo seu território antropizado, com perda da cobertura vegetal nativa. Considerando a área original total de ocupação por Bioma, observa-se que o processo mais intensivo de desmatamento, no Cerrado (54,52%) e na Mata Atlântica (69,63%) ocorreu até 2002 (Idem).

Segundo dados do Atlas dos Remanescentes Florestais da Mata Atlântica, formulado pela SOS Mata Atlântica e Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Minas Gerais, somente, é responsável por cerca de metade do desmatamento observado na Mata Atlântica, ou seja, 10.572 hectares, para implantação de eucalipto, inclusive em APP, realizados por grandes empreendimentos. A Bahia, de acordo com os resultados, foi o terceiro estado que mais desmatou no período de 2013 a 2014, em área equivalente a 46 km² (Idem).

Figura 3.10. Carta Avanço da ocupação das terras na bacia do São Francisco, anos 2000, 2010 a 2012.



Fonte: (MMAa, 2016)

A Agência 10envolvimento, membro da Rede Cerrado com atuação no oeste baiano, encaminhou carta denúncia ao Ministério do Meio Ambiente (MMAb) e vários órgãos envolvidos com a proteção ambiental, em decorrência da emissão de licença ambiental autorizativa de 45 processos de supressão de vegetação nativa no Cerrado do oeste baiano, envolvendo 76.242 hectares, entre os meses janeiro e junho de 2015. A denúncia destaca o fato das autorizações ocorrerem sobre áreas de recarga do aquífero Urucuia, que comprovado por estudos, vem provocando o rebaixamento da vazão dos rios do oeste baiano, vitais contribuintes do Rio São Francisco. A instituição demonstra preocupação com o desmatamento oficial estadual

do Cerrado, uma vez que a ele se deve somar as autorizações municipais e os contínuos desmatamentos ilegais (Idem).

Na região do Médio São Francisco, o processo de desmatamento registrado para o período indica que 84% da Mata Atlântica original ainda se mantêm na macrozona, enquanto que, no Cerrado e na Caatinga, restam pouco mais de 56% e 54%, respectivamente, na cobertura nativa original. As causas de desmatamento no Médio São Francisco se repetem de forma idêntica às causas do Alto, com a expansão da área de agropecuária no Cerrado no centro-oeste e dos perímetros irrigados mais a norte, na Caatinga da Bahia (Idem).

No Submédio São Francisco a Caatinga sofre pressão em áreas pontuais, como nos perímetros irrigados em Petrolina, com expansão para Santa Maria da Boa Vista, Lagoa Grande e Terra Nova, além dos municípios ao longo do Canal do Sertão Pernambucano, com perímetros irrigados implantados (25 projetos de responsabilidade da Codevasf e 10 implantados pela Chesf), ou em estudo, com a possibilidade de novas áreas de irrigação a partir da implantação do Projeto de Integração do Rio São Francisco ou com o extrativismo florestal para fornos de calcinação das empresas gesseiras nos municípios no entorno de Araripina.

A mineração da gipsita também traz seus impactos no processo extrativo, com importância na intervenção na Caatinga em Pernambuco. Na Bahia, a exploração de fosfato em Luís Eduardo Magalhães, de cromo no município de Andorinhas e a mineração de urânio em Caetité, dão sua contribuição para o desmatamento e contaminação do solo, águas e de operários e moradores da região.

Ademais, o maior índice de desmatamento deste bioma é registrado até 2002 (43,77%), caindo nos sete anos seguintes, com desmatamento na ordem de 2,5%. Considerando o acumulado no desmatamento até 2009, a área residual nativa de Caatinga fica próxima a 54% no Submédio sanfranciscano. Atualmente a Mata Atlântica equivale a 18,95% da área total do Baixo São Francisco, e a Caatinga a 81,05%, equivalendo a 19.982,50 Km² de área original. Deste total, até 2002 a Caatinga foi desmatada em 85,28%. Nos sete anos seguintes, mais 2,97% da Caatinga foi erradicado. A situação mais crítica ocorreu na Mata Atlântica, que teve 96,24% de sua área desmatada até 2002, com mais 0,27% nos anos seguintes. Da área original dos Biomas as áreas residuais eram, em 2009, não mais que 3,49% da Mata Atlântica e 14,75% da Caatinga. Segundo o Atlas de Remanescentes Florestais da Mata Atlântica, no período 2013-2014 não houve registro de desmatamento nas áreas de mangue, sendo computados 229,31 km² do ecossistema

associado dentro de Sergipe, a quarta maior área do país, após Bahia, Paraná e São Paulo (MMAb, 2016).

Cabe lembrar a Meta Brasileira da Biodiversidade Nº11, que estabelece o fortalecimento até 2020, do Sistema Nacional de Unidades de Conservação – SNUC, de modo que seja alcançando um percentual mínimo de 17% para os biomas contidos na BHSF: Caatinga, Cerrado e Mata Atlântica, em áreas de proteção integral, ou seja, excetuando-se APAs, RPPN, RLs (Reservas Legais), APPs (Área de Proteção Permanente), territórios indígenas e territórios quilombolas.

3.1.5. Condições de Saneamento Básico

O Alto São Francisco é a única região da bacia que apresenta valores de atendimento urbano de abastecimento de água, esgotamento sanitário e coleta de resíduos sólidos dentro das metas do Plano Nacional de Saneamento básico. Isto se deve provavelmente à presença da região metropolitana de Belo Horizonte com seus 26 municípios, que numa área de 6.255 km² (menos de 1% da área da bacia), concentra mais de 5.767.414, ou cerca de 30% da população de toda a bacia hidrográfica do rio São Francisco (CBHSF, 2015).

Com relação às instalações sanitárias, no Alto São Francisco a média de domicílios sem instalações sanitárias é de apenas 0,32%. Nesta região, vale ressaltar os municípios de Santana de Pirapama – MG, com 11,35% e Alvorada de Minas – MG, com 13,15% de seus domicílios sem instalações sanitárias. Em contrapartida, os municípios de Cachoeira da Prata – MG, Fortuna de Minas – MG e Japaraíba – MG possuem os domicílios em sua totalidade com algum tipo de instalação sanitária.

Embora pouco desenvolvido e dominado pela atividade pecuária, o Médio São Francisco, nas duas últimas décadas, tem crescido de modo desordenado, nos setores da atividade agrícola moderna e agroindustrial. Essa região é a que possui um importante trecho navegável do rio e é onde se encontram os maiores afluentes.

No Médio São Francisco a média de domicílios sem instalações sanitárias é de 6,30%, entretanto, a quantidade de municípios com mais de 15% de domicílios sem instalações sanitárias é grande. É o caso, por exemplo, dos municípios de Barra – BA (36,74%), Buritirama – BA (30,34%), Campo Alegre de Lourdes – BA (42,15%), Guarani de Goiás – GO (17,52%), São Domingos – GO (20,39%), Bonito de Minas – MG (47,63%) e Urucuia (22,66%).

Na região do Sub-médio São Francisco, a média de domicílios sem instalações sanitárias é a mais alta da Bacia com 14,33%, destaque para Andorinha – BA (32,46%), Macururé – BA (29,89%), Afrânio – PE (27,99%), Bodocó – PE (36,09%) e Carnaubeira da Penha – PE (62,6%). Por fim, o Baixo São Francisco apresenta em média 9,97% dos domicílios sem instalações sanitárias. Nesta região fisiográfica destacam-se os municípios de Canapi – AL (32,07%), Mata Grande – AL (30,00%), Poço das Trincheiras – AL (34,06%) e Buíque – PE (24,38%).

Nesta região está localizada a barragem de Xingó, a mais eficiente em termos de produção, de todo o complexo hidroenergético do São Francisco. A região apresenta os mais baixos valores de atendimento urbano de abastecimento de água, esgotamento sanitário e coleta de resíduos sólidos em relação às demais regiões da bacia (CBHSF, 2015). A economia do Baixo São Francisco é baseada na agricultura de arroz e da pesca. No entanto, por serem pequenas áreas cultivadas e as culturas de baixo valor comercial, a situação socioeconômica dos seus habitantes é dificultada. Não há grandes indústrias e seu comércio, uma vez pujante, hoje é incipiente. Os projetos de agricultura irrigada desenvolvidos nas principais várzeas deste último trecho do São Francisco, juntamente com a barragem de Xingó, a última da cascata de represas no canal principal do rio, interferiram na pesca da região, mudando todo o ecossistema do rio (HOLANDA *et al.*, 2009).

3.2. Seleção dos modelos utilizados na pesquisa

Após a realização dos estudos preliminares sobre os caracteres geográficos, socioeconômicos, geomorfológicos, geológicos, climáticos e do uso e ocupação das terras pertinentes pôde-se confirmar que a bacia hidrográfica do rio São Francisco representa um sistema de elevadíssimo grau de complexidade. Um modelo unificado que tenha previsão para todo o conjunto de subsistemas que compõem o sistema bacia hidrográfica do rio São Francisco ainda é desconhecido.

Apesar do conhecimento de diversos modelos, bastante parcimoniosos e com alta reputação de bons resultados, na presente pesquisa se partiu da consideração de algumas premissas básicas, que precisam ser apontadas com antecedência, as quais foram:

- 1) Que o conhecimento e quantificação do comportamento da água ao longo da estratificação natural, em camadas, dos solos é imprescindível para o estabelecimento de qualquer plano de gestão e manutenção de regimes de vazões;

- 2) Que, em se considerando os fenômenos hidrológicos como estacionários, porém passíveis de oscilações de caráter sazonal de curtas (anuais) e longas durações (decadal, seculares), poderia haver na série de dados empíricos das chuvas ocorridas durante período pré-construção das grandes barragens no rio São Francisco, um conjunto de dados consecutivos, representativos de uma ocorrência, em termos de baixos volumes anuais precipitados e de longa duração, maior ou igual a cinco anos, análoga à da crise hídrica vigente, devidamente acompanhados das medições das vazões realizadas;
- 3) Que a partir da relação existente entre volumes precipitados e os volumes realizados pela bacia hidrográfica compreendidos naquele período pré-regularização das vazões, se tem um bom referencial para realização de avaliações comparativas com as relações que estão sendo encontradas, entre as mesmas variáveis (chuva/vazão), durante o período de crise hídrica atual;
- 4) Que somente conseguir-se-ia valores simulados confiáveis, se os mesmos pudessem ser obtidos a partir de uma simulação de vazões, relativas ao período de crise hídrica atual do rio São Francisco, através de um modelo hidrológico conceitual, distribuído, determinístico, contínuo e que tenha sido calibrado e validado a partir de uma série representativa de dados empíricos pré-barragens, através da técnica de calibração distribuída (multi-site);
- 5) Que poder-se-ia dispor de um modelo chuva-vazão concentrado, conceitual, contínuo, determinístico para suprir eventuais falhas de dados, a nível das sub-bacias afluentes, e também possibilitando a verificação da qualidade das simulações, a nível local (sub-bacias), realizadas pelo modelo distribuído de escolha.

A melhor alternativa que se sabia contar com um nível de abrangência nas estimativas integradas das componentes hidrológicas teóricas mais elementares como a evapotranspiração, interceptação, armazenamento superficial, infiltração, distribuição entre os diferentes horizontes dos solos, escoamento superficial, perdas para aquífero profundo e que, sobre tudo isso, comportam desde as questões relacionadas à produção (vazão) até a qualidade das águas, de modo distribuído, e contando com componentes relacionados às práticas agrícolas de plantio/defensivas convencionais, e também às práticas conservacionistas (*Best Management Practices*), estadiamento do desenvolvimento da vegetação, com suporte à presença de barragens e com provisão para os lançamentos de esgoto doméstico e efluentes industriais em qualquer ponto ao longo da malha de drenagem da bacia hidrográfica. Que trate ainda da determinação do carbono, do nitrogênio e do fósforo (advindos, difusamente, da ciclagem orgânica que ocorre nos

solos e das aplicações de agroquímicos e, pontualmente, dos lançamentos de efluentes diretamente nas calhas de drenagem), determinação da dispersão microbiológica e das variações da clorofila A nos cursos d'água. O modelo SWAT é de livre distribuição, código fonte aberto e gratuito, sendo um dos modelos mais abrangentes disponíveis em termos das saídas passíveis de serem produzidas e de grande interesse à gestão e planejamento dos recursos hídricos sob perspectivas ambientais e sócio-econômicas. Sendo um dos modelos que foram avaliados pela USEPA (*United States Environmental Agency*) quanto às capacidades para o desenvolvimento de TMDLs (*Total Maximum Daily Loads*, (USEPA, 2017)).

O conhecimento das premissas listadas é de fundamental importância para a compreensão de como fora estabelecida a ordenação das etapas de trabalho da pesquisa, onde primeiramente se estabeleceu a modelagem com a ferramenta ArcSWAT (TAMU, 2013) como prioritária e que somente se recorreria a algum modelo chuva-vazão, concentrado, no momento em que houvesse qualquer limitação a qual pudesse ser suprida pelo mesmo. O modelo concentrado selecionado se deu através das orientações de pesquisa, no caso o Tank Model se destacou.

Segundo Vasconcellos (2017), o Tank Model representa esquematicamente a estratificação das camadas do solo, da superfície à base. Desta estrutura, a autora desenvolve sua Tese de que o armazenamento calculado em cada reservatório é uma medida representativa do estado real de umidade nas diferentes camadas do solo. Esta foi a principal característica, sua composição representativa de compartimentos do solo associados ao ciclo hidrológico, que o tornara atrativo e ainda, a de que poderia ser implementado muito rapidamente, a partir de uma codificação bastante simples, via alguma linguagem de programação de computadores ou até mesmo via planilha de cálculo. Estas possibilidades e os bons relatos de resultados que se encontrara nas publicações pesquisadas, foram suficientes para qualificar o modelo Tank Model como um modelo de escolha.

3.3. Modelagem SWAT

Percebe-se que, depois de identificada a bacia hidrográfica, objeto de estudo hidrológico, deve-se procurar ter conhecimento sobre as atividades humanas que nela são realizadas, inclusive suas localizações e extensões. No caso de uma modelagem hidrológica distribuída, um bom reconhecimento de contextos climáticos regionais e suas interações com a bacia é tão fundamental quanto a compreensão das fundações geológicas da área. Estas diferentes dimensões e espaços da bacia hidrográfica é que subsidiam a decisão sobre quais tipos de dados que serão

necessários e os níveis ideais de levantamento dos mesmos. Daí é que se poderá partir em busca da obter as informações sobre o monitoramento, o registro e a disponibilidade de dados, acerca das variáveis ambientais de interesse. Os dados, por sua vez, deverão passar por profundo processo denominado Análise Exploratória de Dados (AED), o que será detalhado no final do capítulo.

É essencial para a calibração de modelos distribuídos de grandes bacias hidrográficas que não haja restrição quanto à disponibilidade de séries estatisticamente representativas de dados de chuva e vazão, ao menos, pois conforme Rouhier *et al.* (2017); Nakiaka *et al.* (2017); Akay *et al.* (2018); muitos estudos têm demonstrado a maior eficácia da calibração de modelos hidrológicos distribuídos com dados provenientes de diferentes partes das calhas de drenagem, num procedimento conhecido como calibração simultânea de múltiplos locais (single-site-multi-site (SMSC)) . Os autores Wang *et al.* (2012); Wi *et al.* (2015); Leta *et al.* (2017) informam que as calibrações obtidas a partir de dados do fluxo medido apenas na saída da captação (calibração single-site (SSC)) pode não ser extensíveis para as demais estações fluviométricas no interior da bacia hidrográfica.

Além dos dados de registro de variáveis hidrológicas, muitas informações sobre entidades (camadas) que têm seus elementos (feições) definidos a partir de zoneamentos são também exigidos. Os exemplos clássicos destes tipos de dados são as informações sobre solos e cobertura florestal, os quais sofrem diferenciações em feições a partir da estimativa de atributos específicos. No caso dos solos, por exemplo, o processo de classificação se dá através de propriedades físicas e químicas para cada tipo de solo identificado, no caso das coberturas florestais, que é conseguida a partir dos atributos fitofisionômicos, do porte, da densidade, das espécies, entre outros caracteres.

Tais informações são essenciais e geralmente estão disponíveis em arquivos tipo vetorial e tabular. Os arquivos vetoriais contêm definições de polígonos (feições) de zoneamentos sob a forma de vetores. Os tabulares contêm dados dispostos no formato de tabelas, onde cada linha associa-se a uma feição e as colunas aos valores de cada atributo.

Outra informação muito importante é sobre o relevo, mas que, no caso do modelo SWAT consiste apenas na aquisição de um MDT da área que contempla a bacia hidrográfica. Este tipo de informação é geralmente encontrada no formato de arquivos digitais de imagens assim,

consistem de uma série de pontos “*pixels*” com coordenadas geográficas precisas e um valor de atributo, no caso do MDT, a altitude.

Tecnicamente, os arquivos tipo MDT são denominados tipo *raster*. Neste sentido, a SRTM, que foi uma missão espacial feita a bordo da espaçonave Endeavour entre 11 e 22 de fevereiro do ano 2000, percorrendo 176 órbitas a 233 km de altitude, com inclinação de 57°, obtendo dados topográficos de aproximadamente 80% do globo terrestre entre as latitudes 60°N e 56°S (USGS, 2017). Seus sensores operaram em duas bandas C (SIR-C dos Estados Unidos) e X (X-SAR da parceria entre Alemanha e Itália). Devido a alta resolução os dados da banda X tiveram uma baixa cobertura (DLR, 2017). Os dados SRTM banda C foram trabalhados nos Estados Unidos que inicialmente os disponibilizava devidamente tratados, com resolução de 30m somente para os Estados Unidos e de 90m para as demais regiões levantadas.

A partir de 2015 foram disponibilizados todos dados com resolução de 30m, porém nem todas as cenas estão livres de vazios (*NoData*) e *outliers* (medidas extremas, muito altas ou muito baixas). (NASA, 2014). No presente estudo, foram avaliados dois MDTs, um com resolução de 90m, produzidos pelo Centro Internacional para Agricultura Tropical (CIAT) em sua versão 4.1 (JARVIS, 2008), onde as regiões com vazios do SRTM original, foram preenchidas a partir do método descrito por Reuter *et al.* (2007).

O segundo MDT utilizado foi o com resolução de 30m, obtido a partir do repositório *Earthexplorer* do Departamento de Geologia dos Estados Unidos (USGS, 2017). Contudo, para que se pudesse trabalhar com os mesmos, foi necessário realizar procedimentos de preenchimento de falhas (vazios ou *No Data*) e remoção de *outliers* (valores negativos ou muito elevados) dos arquivos *raster* originais.

Procedimentos convencionais disponíveis na maioria dos SIGs modernos foram utilizados para este fim. O primeiro passo consistiu na remoção dos valores negativos através do uso de uma função condicional onde um novo *raster* é gerado, contendo somente os valores de cota iguais ou superiores a zero, pontos com valores inferiores são deixados vazios.

O segundo procedimento consistiu no preenchimento dos vazios através de um procedimento de reclassificação do *raster*, onde os vazios foram substituídos pelo valor zero. O terceiro e último passo, consistiu da substituição dos zeros e dos eventuais *outliers* por novos valores com base na informação dos vizinhos mais próximos através de um procedimento de interpolação.

Para finalizar, os MDTs gerados foram agrupados em uma cena única e reprojetados para um sistema de coordenadas métricas planas, SIRGAS 2000 Mercator. Este procedimento é necessário para o funcionamento do módulo de delineamento da bacia hidrográfica em todas as suítes disponíveis do SWAT, visto que são necessários cálculos de distâncias e áreas nesta etapa do processamento. Visando uma redução do tamanho final dos MDTs, procedeu-se também o recorte dos mesmos através do uso de uma camada vetorial abrangendo a área objeto da pesquisa, a bacia hidrográfica do rio São Francisco, acrescida de *buffer* de 50 km a fim de contornar possíveis efeitos de borda. Finalmente, de posse dos MDTs,

A partir deste ponto, o primeiro passo numa modelagem com SWAT consiste em se subdividir a bacia hidrográfica em diversas bacias menores e cada uma destas, por sua vez, é dividida em Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs), que são áreas relativamente pequenas assumidas como tendo propriedades uniformes de solo, declividade e de uso/ocupação das terras.

No procedimento de discretização da bacia, optou-se por um número de sub-bacias suficientes para se traçar alguns paralelos com os resultados obtidos por Creechet *al.* (2015). Isto foi feito através da interface de delineamento de bacia hidrográfica existente na suíte ArcSWAT 2012 (TAMU, 2013). Pôde-se concluir o delineamento da bacia hidrográfica do rio São Francisco após a definição dos pontos de controle de interesse (*inlets*) e do exutório.

Dando continuidade, procedeu-se o preparo dos dados primários a serem usados na etapa denominada Análise de HRUs, disponível nas suítes integradas à SIGs do SWAT, que são os seguintes: MDT (os mesmos utilizados na etapa anterior), a carta de solos e a de uso/ocupação das terras. As referidas cartas podem estar tanto no formato vetorial quanto no formato *raster*, mas é imprescindível que possuam uma tabela de atributos específicos associada às mesmas, onde conste ao menos um campo chave que servirá para vinculação à base de dados interna do SWAT com os dados físicos tabulares dos solos e das culturas/tipos de ocupação das terras (WINCHELL *et al.*, 2013).

Em relação à carta de uso/ocupação das terras, considerando-se que num primeiro momento, a presente pesquisa objetiva montar um cenário primitivo para a bacia hidrográfica do rio São Francisco, que represente de certo modo, o período anterior ao descobrimento do Brasil, optou-se então pelo uso da carta de biomas brasileiros (MMAc, 2015), a qual foi reprojetada para o sistema de projeção planejado SIRGAS 2000 Mercator e recortada a partir da máscara da bacia do rio São Francisco. Em relação às coberturas de vegetação para cada um dos biomas ali

identificados, procurou-se uma correlação de cobertura na base de dados preexistente disponibilizada pelo SWAT.

Quanto a carta de solos, foi obtida a partir de MMAc (2015). Quanto aos atributos dos solos, uma vez que não se objetiva implementar nenhuma mudança nos mesmos para qualquer dos cenários que venham a ser elaborados na presente pesquisa, procurou-se então estruturá-los da forma mais abrangente e completa possível. Para isso, dados de diversas fontes foram necessários.

A primeira fonte de dados foi a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), onde dados tabulares dos resultados de análises pedológicas e de análises físicas de amostras obtidas em trincheiras ao longo da bacia do Rio São Francisco foram obtidos (EMBRAPA, 2015).

Outras fontes de dados tabulares avaliadas foram a do *International Soil Reference and Information Center* (ISRIC, 2017), na seção do programa *Soil and Terrain Database for Latin America and the Caribbean* (SOTERLAC) versão 2.0 (van ENGELN, 2005) e a do *Harmonized World Soil Database* (HWSD) versão 1.2 (FAO, 2017). Como na base da EMBRAPA, estas outras duas fontes de dados disponibilizam informações como: carbono orgânico, pH, capacidade de armazenamento de água, profundidade do solo, capacidade de troca catiônica do solo e da fração de argila, nutrientes trocáveis totais, condutividade elétrica, salinidade, classe textural e granulometria.

De posse das informações tabulares dos solos, a partir do georreferenciamento de cada uma das trincheiras amostrais e do recorte daquelas de interesse contidas na área objeto da pesquisa, partiu-se para o cálculo dos parâmetros necessários ao cadastro dos solos no SWAT, que foram feitos através da função de pedotransferência de Saxton e Rawls (2006), da equação proposta por Baumer (1990) para cálculo do albedo, usada no modelo *Water Erosion Prediction Project* (WEPP) (ARS, 2017) e o parâmetro USLE K foi calculado pela equação de Wischmeier *et al.* (1971) (AUERSWALD *et al.*, 2014).

Deste modo, puderam ser cadastradas todas as informações acerca dos solos disponíveis para a bacia hidrográfica do rio São Francisco. Os cálculos fazem uso da planilha eletrônica dos Drs. Narasimhan Dhanesh, do departamento de Engenharia Civil do Instituto de Tecnologia de Madras (Índia). Tais informações sobre os solos, requeridas pelo modelo SWAT são: número de camadas (nLayers); espessura camada (SOL_Z); grupo hidrológico do solo (HYDGRP); profundidade máxima de enraizamento (SOL_ZMX); fração de porosidade a partir do qual são

excluídas anions (ANION_EXCL); o volume potencial de rachaduras no solo (SOL_CRK); densidade úmida (SOL_BD); capacidade de água disponível (SOL_AWC); condutividade hidráulica saturada (SOL_K); teor de carbono orgânico (SOL_CBN); percentuais de argila, silte, areia e de rochas (CLAY, SILT, SAND, ROCK); albedo solo úmido (SOL_ALB); e Fator Universal da Equação de perda de solo (USLE) erodibilidade (K) (USLE_K), para cada um dos horizontes dos solos nos perfis amostrados.

Finalmente, de posse das camadas vetoriais do uso/ocupação das terras e dos tipos de solos e com o banco de dados do SWAT devidamente alimentado com os dados de todas as eventuais culturas/coberturas e tipos de solos necessários, foram processadas todas as etapas da Análise de HRUs, tendo sido necessárias também as classes de declividade a serem tratadas. Na presente pesquisa foram adotadas as classes de declividade definidas pela EMBRAPA (EMBRAPA, 2006), ou seja, de 0° a 3° (terrenos planos), de 3° a 8° (suave ondulado), de 8° a 20° (ondulado), de 20° a 45° (forte-ondulado) e acima de 45° (montanhoso e forte-montanhoso).

Já na etapa de Definição das HRU's, procedeu-se a determinação das faixas de cortes entre tipos de solo pelo uso/ocupação pela declividade do seguinte modo: considerar áreas onde uso/ocupação participe em no mínimo 10% da área total da sub-bacia, considerar os tipos de solos que ocupem no mínimo 15% em relação à área total do uso/ocupação das terras e considerar as declividades que incidam sobre no mínimo 10% dos tipos de solos.

Para a execução do modelo SWAT, é preciso também de dados climáticos, que consistem em séries históricas de dados diários de precipitação (mm); temperatura mínima e máxima do ar (°C); umidade relativa do ar (%); velocidade do vento (m/s); radiação solar (MJ/m²/dia). Para este fim, foram considerados dados relativos às coordenadas geográficas de 70 das 77 estações pluviográficas consideradas por Prusky (2002). As estações foram acessadas a partir do portal Hidroweb da ANA (2015).

Quanto aos dados diários das cinco variáveis climáticas requeridas pelo SWAT, utilizaram-se os dados *gridded*, disponibilizados a partir da pesquisa de Xavier (2016), para obtê-los naquelas coordenadas das estações selecionadas. Tal procedimento permite a redução dos erros nos dados de precipitação, uma vez que Xavier (2016) cita que a principal fonte para tais dados fora a ANA e, considerando a metodologia adotada pelo autor, o erro é menor quando da obtenção dos dados *gridded* nas respectivas coordenadas das estações de origem. Tais dados não apresentam ausência de valores para todo o período de interesse, de janeiro de 1980 a dezembro

de 2016. Destaque-se que foram considerados 10 (dez) anos como dados para aquecimento do modelo.

Os dados *gridded* foram muito importantes, uma vez que além do que já foi considerado acerca da precipitação, Xavier (2016) trabalhou os demais dados climáticos exigidos pelo modelo SWAT e para isso utilizou dados primários provenientes do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), para aquele período de sua pesquisa, igualmente, o autor continua a disponibilizar atualizações, estando disponíveis dados até o ano de 2016 atualmente.

A técnica aplicada permitiu um ótimo ajuste destes dados para as regiões em que os mesmos não são monitorados devido à falta de equipamentos e, por outro lado, o autor disponibilizou uma segunda camada (também em formato *gridded*) onde constam os erros estimados para cada dado gerado, a partir do interpolador utilizado naquele estudo. Foram testadas estatisticamente e validadas, para toda a massa de dados primários, cinco técnicas de interpolação. Para a extração dos dados *gridded*, no presente estudo foram utilizados softwares livres a exemplo da linguagem R, no ambiente RSTUDIO (ALLAIRE, 2015) e da linguagem Free Pascal (KAEMPFL, 2016) para formatação dos dados no padrão do SWAT.

A segunda fonte de dados climáticos para a constituição dos modelos foram a da Global Weather (TAMU, 2017). Estes dados são produto de um modelo global climático que considerou as interações entre a atmosfera, os oceanos, as superfícies terrestres e as congeladas durante um período de trinta e seis anos, de 1979 a 2014, este modelo foi desenvolvido pela *Climate Forecast System Reanalysis* (CFSR) e os dados diários de precipitação, velocidade do vento, umidade relativa do ar, temperaturas (máxima e mínima) do ar e a radiação solar são disponibilizados para download já no formato exigido pelo modelo SWAT.

O modelo foi executado em três cenários diferentes: um com o MDT de 30m (USGS, 2017) utilizando-se os dados climáticos Global Weather (TAMU, 2017), outro com o MDT de 90m (JARVIS, 2008) e dados climáticos Global Weather e o terceiro modelo com o MDT de 90m e dados climáticos de Xavier (2016). As classes de uso/ocupação das terras, tipos de solos e faixas de declividade foram iguais para os três modelos, como também as faixas de corte para definição das HRUs.

3.4. Modelagem TANK

Segundo Sugawara (1995), o modelo Tank Model é aplicado para analisar vazões a partir das respectivas entradas de precipitação e evaporação. O Tank Model foi aplicado para analisar

vazões diárias a partir das respectivas entradas de precipitação e evaporação da bacia hidrográfica do rio São Francisco, considerada todas as contribuições desde a região das nascentes até altura da estação fluviométrica da ANA, nº46998000, em de Pão de Açúcar/AL, abrangendo mais de 95% da área da bacia.

O modelo Tank Model adotado para esta pesquisa é apresentado na Figura 3.11. Notar que $Q(i)$ está sendo dividido pela constante 2630 (dois mil seiscentos e trinta) de modo que os resultados das saídas são convertidos para valores médios mensais. Caso se deseje obter valores diários, como na presente pesquisa, esta constante deverá ser modificada para 7.2 (sete inteiros e dois décimos) e neste caso, os valores das entradas da precipitação e da ETP deverão representar os acumulados diários e, no caso anterior, acumulados mensais.

Destaque-se que, de início se realizara a implementação, em linguagem de programação Object Pascal, da rotina de calibração apresentada originalmente nas linguagens Fortran e Basic, por Sugawara (1986). Tentou-se também pelo método de Levenberg-Marquardt, em linguagem R. Finalmente, optou-se pelo desenvolvimento de uma técnica própria, em Object Pascal. Todas estas abordagens não foram bem sucedidas. Paralelamente, foi-se desenvolvendo a ferramenta de calibração manual, o TKM, com resultados gradativamente melhores, para os mais diversos recortes da bacia hidrográfica do rio São Francisco.

A questão da realização de uma calibração para a bacia até a altura da estação fluviométrica da ANA nº46998000, se deu conforme se avançava na composição de dados diários de chuvas Thiessen, que foram permitindo se tomar os dados empíricos diários de vazão cada vez mais à jusante, na calha principal do rio.

O recorte inicial do estudo se deu na área que compreende a região da nascente principal do rio São Francisco, a partir das vazões em Porto de Andorinhas/MG, em seguida o recorte foi ampliado até Três Marias/MG, depois até São Francisco/MG, na sequência veio Manga/BA, depois Barra/BA e finalmente Pão de Açúcar/AL.

Como nos resultados obtidos, conforme se aumentava a área do recorte, e não representavam uma perda relevante em relação aos estimadores estatísticos, resolveu-se prosseguir até que se abrangesse a totalidade da área de interesse, o que resultou também num bom ajuste da calibração do modelo TKM, conforme as recomendações de Moriasi (2007).

Figura 3.11. Equações do Modelo Tank Model

$$\begin{aligned}
 y_1(i) &= a_1 \cdot [X_1(i) - h_1] & (6) \\
 y_2(i) &= a_2 \cdot [X_1(i) - h_2] & (7) \\
 y_3(i) &= a_3 \cdot [X_2(i) - h_3] & (8) \\
 y_4(i) &= a_4 \cdot [X_3(i) - h_4] & (9) \\
 y_5(i) &= a_5 \cdot X_5(i) & (10) \\
 z_1(i) &= b_1 \cdot X_1(i) & (11) \\
 z_2(i) &= b_2 \cdot X_2(i) & (12) \\
 z_3(i) &= b_3 \cdot X_3(i) & (13) \\
 z_4(i) &= b_4 \cdot X_4(i) & (14) \\
 X_1(i) &= \max [X_1(i-1) + P(i) - Ep(i) & (15) \\
 &\quad - y_1(i) - y_2(i) - z_1(i); 0] \\
 X_2(i) &= X_2(i-1) + z_1(i) - y_3(i) - z_2(i) & (16) \\
 X_3(i) &= X_3(i-1) + z_2(i) - y_4(i) - z_3(i) & (17) \\
 X_4(i) &= X_4(i-1) + z_3(i) - y_5(i) - z_4(i) & (18)
 \end{aligned}$$

Fonte: Nunes *et al.* (2014 - Modificado)

onde $y_1(i)$, $y_2(i)$, $y_3(i)$, $y_4(i)$ e $y_5(i)$ são as lâminas de vazão no mês i , em mm; $z_1(i)$, $z_2(i)$, $z_3(i)$ e $z_4(i)$ são os valores de infiltração em cada tanque no mês i , em mm; $X_1(i)$, $X_2(i)$, $X_3(i)$ e $X_4(i)$ são as profundidades de armazenamento no mês i (mm); $Q(i)$ é a vazão (m^3/s) no mês i ; e $P(i)$ é a precipitação (mm) no mês i ; $Ep(i)$ é a evaporação potencial na bacia no mês i , em mm; e Ad é a área de drenagem da bacia, em km^2 . O procedimento de calibração tem como objetivo encontrar um conjunto ótimo de valores para os parâmetros a_1 , a_2 , a_3 , a_4 , b_1 , b_2 , b_3 , b_4 , h_1 , h_2 , h_3 e h_4 .

O desenvolvimento de uma ferramenta de auto-calibração deixou de ser objetivo, dando-se preferência a manutenção da interface TKM, visto que opera em sinergismo com o ganho de experiência do modelador, já que o maior interesse não é somente o aumento da velocidade na execução do processo, outrossim, uma forma de se poder estudar melhor o funcionamento do modelo Tank Model. A ferramenta se construiu assim sobre um fundamento, o de que com o ganho na facilidade adquirida a partir de uma melhor compreensão das características hidrológicas de uma área (dada pelo modelo Tank), haverá outro ganho que será o aumento da agilidade na calibração manual. Que é ainda mais facilitada pela visualização instantânea do

ajuste gráfico e do coeficiente NSE obtidos a partir dos ajustes realizados diretamente em cada um dos parâmetros de cada reservatório do modelo.

A criação de uma interface gráfica mínima, o TKM, com botões de rolagem, foi relativamente simples através do uso de IDEs (*Integrated Developer Enviroment*) que estão disponíveis para diversas linguagens de programação com versões livres. No presente estudo, utilizou-se IDE Delphi 7 *Standart Edition* da antiga Borland.

A definição de um orifício de drenagem no tanque quatro foi implementada no modelo. Isto, aliado à possibilidade de se ajustar a sensibilidade em tempo real, de cada parâmetro de diâmetro dos orifícios laterais e de drenagem, permitem a aceleração da apreensão do comportamento de pequenas e de grandes bacias. Partindo-se de um set de parâmetros harmônicos, proposto pelo próprio criador do modelo Tank Model, Sugawara (1986), e levando em consideração o conhecimento prévio do modelador sobre a bacia, chega-se a bons valores de calibração e ajuste gráfico com poucos movimentos. Pode-se partir de *sets* próprios, que podem ser salvos em arquivos no formato texto, com extensão TKM.

3.5. Calibração e Validação dos Modelos

No processo de calibração dos modelos, os resultados de produção de água simulados são comparados às respectivas vazões históricas registradas pela estação de monitoramento fluviométrico da ANA, nº46998000, em de Pão de Açúcar/AL. Os estimadores utilizados para avaliação foram o da Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE), o da Tendência Percentual (PBIAS) e o da Normalização da raiz do erro médio quadrático pelo desvio padrão da série observada (RSR), conforme recomendações de Moriasi *et al.* (2007).

O modelo SWAT foi calibrado com o auxílio do Software SWATCup (TAMU, 2013). A função objetivo utilizada na calibração automática do SWATCup foi a da redução quadrática pelo erro médio. Em relação ao modelo Tank, o ajuste dos parâmetros de calibração foi feito manualmente, através de ferramenta desenvolvida pelo autor especificamente para utilização nesta pesquisa, onde pode ser visualizada instantaneamente, a cada ajuste, a plotagem gráfica superposta das vazões observadas e simuladas e o ajuste do NSE obtido. A ferramenta encontra-se disponível a partir de: <https://drive.google.com/drive/folders/1q_xjTARloB6MwDk1tpGMHgSZX5o3o1o3?usp=sharing>

Os estimadores estatísticos apresentados abaixo foram utilizados, por fim, para avaliação dos produtos finais, ou seja, das simulações dos modelos calibrados em uma planilha de cálculos, ou seja, nas validações. Eles são definidos pelas seguintes expressões matemáticas:

1) NSE-Eficiência de Nash-Sutcliffe:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (s_i - o_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad (19)$$

EM QUE:

O_i = evento observado;

S_i = evento simulado;

\bar{O} = média dos eventos observados no período de simulação

Os valores de NSE variam entre $-\infty$ e 1, sendo a unidade o valor para o qual os dados simulados se adequam perfeitamente às observações. Valores entre 0 e 1 são geralmente tidos como aceitáveis (MORIASI *et al.*, 2007).

2) PBIAS-Tendência Percentual:

$$PBIAS = 100 \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - O_i)}{\sum_{i=1}^N O_i} \quad (20)$$

Para uma relação ótima tem-se PBIAS igual a zero sendo que valores de pequena magnitude indicam bons ajustes. Valores positivos indicam uma superestimação dos valores simulados enquanto valores negativos indicam uma subestimação dos valores simulados (MORIASI *et al.*, 2007).

3) RSR-Normalização da raiz do erro médio quadrático pelo desvio padrão da série observada:

$$RSR = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - S_i)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}} \quad (21)$$

O coeficiente RSR incorpora os benefícios estatísticos dos índices de erro e inclui um fator de escala/normalização, de modo que valores estatísticos resultantes são relatados poderem ser aplicados de forma consistente. RSR varia entre o valor ideal 0 (zero) e um grande valor positivo (MORIASI *et al.*, 2007).

3.6. Técnicas de AED e uso de Estimadores Estatísticos

A apresentação gráfica dos dados pode auxiliar fornecendo importantes indicações seja para as possíveis mudanças nas tendências, seja na criação de hipóteses a respeito da natureza

das tendências, que posteriormente devem se sujeitar a aplicação de testes formais de significância (GRAYSON *et al.*, 1996).

O exame visual dos dados faz parte da Análise Exploratória dos Dados (AED), que envolve o uso de gráficos e outros métodos para entender e representar informações relevantes. Segundo Kundzewicz e Robson (2000) um estudo de não estacionariedade que não contemple a análise exploratória dos dados, é um estudo incompleto.

No presente estudo, utilizou-se desde as análises gráficas mais básicas, através de simples plotagem dos dados, ao uso de tratamento nos mesmos para a consecução de realces e melhor destaque nas plotagens. Um bom exemplo destes tratamentos é o da técnica RAPS (*Rescaled Adjusted Partial Sums*) proposta por Buishand (1984), da seguinte forma:

$$X_k = \sum_{t=1}^k \frac{Y_t - \bar{Y}}{S_Y}; \quad k = 1, \dots, n \quad (22)$$

X_k RAPS em k ; Y_t = valor da variável em t ; \bar{Y} = média da amostra; S_Y = desvio padrão da amostra; n = tamanho da amostra; k = contador limite da soma atual.

As estatísticas básicas tais como média, mediana, variância, desvio padrão, excesso de curtose e assimetria das séries foram também utilizadas. Na sequência estão apresentados os estimadores pelas Equações (23), (24), (25), (26), (27) e (28) respectivamente:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (23)$$

$$\text{ÍMPAR} \rightarrow x_{md} = x_{\frac{n+1}{2}} \text{ e PAR} \rightarrow x_{md} = \frac{x_{\frac{n}{2}} + x_{\frac{n+2}{2}}}{2} \quad (24)$$

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \quad (25)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (26)$$

$$g = \frac{n}{(n-1)(n-2)} \times \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^3}{S^3} \quad (27)$$

$$k = \frac{n^2}{(n-1)(n-2)(n-3)} \times \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^4}{S^4} - 3 \quad (28)$$

em que X_i é o valor de um evento na posição i -ésima; n é o número total de elementos da amostra; \bar{X} é a média da amostra; x_{md} é a mediana da amostra; s^2 é a variância da amostra; s é o desvio padrão da amostra; g é o

coeficiente de assimetria; k é o excesso de curtose. A mediana é equivalente ao valor da variável de modo que ocorra a separação da frequência total em duas metades de iguais dimensões.

Além disso, foram utilizados testes não paramétricos, os quais são geralmente baseados em rankings ou em relações binárias entre sinais negativos ou positivos nas diferenças entre os dados. Tal característica é a sua principal vantagem, já que não há restrição quanto a distribuição, ou seja, estes testes não requerem que os dados a serem avaliados tenham distribuição normal, ou de qualquer tipo. Estes estimadores foram utilizados na verificação da ocorrência de aleatoriedade, homogeneidade, independência, tendências e identificação de rupturas, de médias e de tendência, nas séries hidrológicas e nas simulações. Os testes foram realizados a um intervalo de confiança de 95%.

Na sequência são apresentados os testes não paramétricos utilizados neste trabalho: Wald-Wolfowitz, Mann Kendall, Inclinação do Sen e o teste de Pettitt.

1) Teste de Wald-Wolfowitz:

Foi desenvolvido em 1943 por Wolfowitz, pioneiro no desenvolvimento de métodos não paramétricos, para verificar a hipótese de independência e estacionariedade de uma série hidrológica, ou seja, verifica se os dados de uma série ocorrem de forma aleatória. Considerando uma amostra x_1, x_2, \dots, x_n de tamanho n , calculase a estatística R pela expressão:

$$R = \sum_{i=1}^{n-1} x_i x_{i+1} + x_1 x_n \quad (29)$$

Wolfowitz (1942), define a Esperança $E(R)$:

$$E(R) = \frac{s_1^2 - s_2}{n - 1} \quad (30)$$

e a Variância $V(R)$:

$$V(R) = \frac{s_2^2 - s_4}{n - 1} - E(R)^2 + \frac{s_1^4 - 4s_1^2 s_2 + 4s_1 s_3 + s_2^2 - 2s_4}{(n - 1)(n - 2)} \quad (31)$$

para as quais s_t é obtida a partir de:

$$s_t = \sum_{i=1}^n x_i^t, \quad t = 1, 2, 3, 4 \quad (32)$$

que para amostras onde $n > 10$, o teste será normalmente distribuído com:

$$z = \frac{R - E(R)}{\sqrt{V(R)}} \quad (33)$$

Para reforço das interpretações dos resultados do teste de aleatoriedade de Wald-Wolfowitz, foram utilizados também os estimadores de Bartels(1982), de Frequência de fase de Moore-Wallis (1943) e de Runs. Finalmente, para verificar a homogeneidade das distribuições dos dados utilizou-se o teste de variância one-way de Kruskal e Wallis. Os procedimentos de calculo são facilitados pela utilização dos pacotes Trends (POHLERT, 2018) e Randtests (MATEUS, 2014) e Tseries (TRAPLETTI, 2018), no ambiente da linguagem de programação R (R CORE TEAM, 2015).

2) Teste Mann-Kendall:

O teste não-paramétrico de Mann-Kendall foi idealizado por Mann (1945), Kendall e Stuart (1963) criaram sua estatística. Pohlert(2018), explica que ele é utilizado para detectar tendências monotônicas em séries de dados ambientais, dados climáticos ou dados hidrológicos. A hipótese nula, H_0 , é que os dados provêm de uma população com realizações independentes e que são identicamente distribuídos. A hipótese alternativa, H_A , é que os dados seguem uma tendência monotônica.

A estatística do teste S a partir da Equação (32).

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(X_j - X_k) \quad (34)$$

com:

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } x > 0 \\ 0 & \text{if } x = 0 \\ -1 & \text{if } x < 0 \end{cases} \quad (35)$$

A média de $S = 0$ e a variância σ^2 é:

$$\sigma^2 = \left\{ n(n-1)(2n+5) - \sum_{j=1}^p t_j(t_j-1)(2t_j+5) \right\} / 18 \quad (36)$$

em que p é o número total de grupos e t_j é o número de observações em cada t_{jh} grupo. A estatística S tem distribuição próxima da normalidade respectiva à Z-transformação apresentada em (34):

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sigma} & \text{Se } S > 0 \\ 0 & \text{Se } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sigma} & \text{Se } S < 0 \end{cases} \quad (37)$$

Ela está relacionada ao coeficiente de Kendall τ , do seguinte modo:

$$\tau = \frac{S}{D} \quad (38)$$

em que:

$$D = \left[\frac{1}{2}n(n-1) - \frac{1}{2} \sum_{j=1}^p t_j(t_j-1) \right]^{1/2} \left[\frac{1}{2}n(n-1) \right]^{1/2} \quad (39)$$

Nos casos de ocorrência de sazonalidade, a exemplo das séries de médias mensais, adotou-se o teste Mann-Kendall sazonal.

3) Estimativa da inclinação do Sen:

Segundo Pholhert (2016), este teste calcula a inclinação (isto é, taxa de variação linear) e intercepta de acordo com o método de Sen. Primeiro, um conjunto de inclinações lineares é calculado da seguinte forma:

$$d_k = \frac{X_j - X_i}{j - i} \quad (40)$$

para $(1 \leq i < j \leq n)$, quando d é a inclinação, X é a variável, n é o tamanho da amostra e i e j são índices. Deste modo, a inclinação é calculada como a mediana de todas as inclinações: $b = \text{Mediana}(d_k)$. O intercepto é calculado a cada t , conforme:

$$a_t = X_t - b * t \quad (41)$$

de forma que o intercepto é também a mediana de todos os interceptos. Para o caso de séries de dados mensais, ou seja, que apresentem sazonalidade, deve-se substituir (40) por:

$$d_{ijk} = \frac{X_{ij} - x_{ik}}{j - k} \quad (42)$$

e neste caso (x_{ij}, x_{ik} para $i = 1, 2, \dots, m$ e $1 \leq i < j \leq n_i$) onde n_i é o número de valores que compõem cada grupo sazonal. O estimador de inclinação para dados sazonais é a mediana de d_{ijk} .

4) Teste de Pettitt

A abordagem de Pettitt (1979) é comumente aplicada para detectar um único ponto de mudança em séries hidrológicas ou séries climáticas com dados contínuos. Testa o H_0 : A variável segue uma ou mais distribuições que possuem o mesmo parâmetro de localização (sem mudanças), contra a alternativa H_A : Existe ao menos um ponto de mudança. É uma estatística não paramétrica que se inicia:

$$K_T = \max |U_{t,T}|, \quad (43)$$

quando

$$U_{t,T} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^T \text{sgn}(X_i - X_j) \quad (44)$$

Um ponto de mudança é identificado quando K_T desenvolve uma estatística p significativa. A significância probabilística de K_T gira em torno de $p \leq 0,05$ o que, de forma aproximada se consegue por:

$$p \simeq 2 \exp \left(\frac{-6 K_T^2}{T^3 + T^2} \right) \quad (45)$$

Para reforçar o teste de Pettitt, são executados outros testes de detecção de pontos de mudança como o Teste de Alcance Buishand, o Teste U de Buishand e o Teste de homogeneidade normal padrão, que trazem ainda uma contribuição muito interessante para a AED, que é a geração de gráficos muito similares ao gráfico RAPS.

3.6. Referências

AKAY, H.; KOÇYIGIT, M. B.; YANMAZ, A.M. Correction to: Effect of using multiple stream gauging stations on calibration of hydrologic parameters and estimation of hydrograph of ungauged neighboring basin. **Arabian Journal of Geosciences**, 11:282. 2018.

- ALLAIRE, J.J. **R Studio**. Disponível em: <<https://www.rstudio.com>>. Acesso em out. 2015.
- AMORIM JR, V. **Avaliação Hidrogeológica do aquífero Urucuia na bacia do rio das Fêmeas usando IP-Resistividade**. 2003. Dissertação (Mestrado em Geofísica) - Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia, Salvador-BA, 82 p., 2003.
- AMORIM JR, V., LIMA, O.A.L. Aquífero Urucuia: uma avaliação hidrogeológica integrando resistividade e polarização induzida no domínio do tempo. **International Congress of the Brazilian Geophysical Society**, 8, Rio de Janeiro, 2003.
- ANA - Agência Nacional de Águas. **Página de acesso a dados das estações pluviométricas da bacia hidrográfica do rio São Francisco**. Disponível em:<<http://hidroweb.ana.gov.br/>>. Acesso em out. 2015.
- ANDRADE, J.B.M., CASCAES, O.S.F. Panorama hidrogeológico do Grupo Bambuí no Oeste da Bahia. In: 6º Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas da Associação Brasileira de Águas Subterrâneas ABAS, Porto Alegre, 1990. **Anais...**, Porto Alegre, 1990. p. 50-57.
- ARS - Agricultural Research Service do United States Department of Agriculture (USDA). In: **WEPP User Summary (1995)**. Disponível em:
<<https://www.tucson.ars.ag.gov/unit/publication/PDFfiles/1172.pdf>>. Acesso em mar. 2017.
- AUERSWALD, K., FIENER, P., MARTIN, W., ELHAUS, D. Use and misuse of the K factor equation in soil erosion modeling: An alternative equation for determining USLE nomograph soil erodibility values. **Catena (Journal)**, Vol. 118: pp. 220-225, 2014.
- BARTELS, R. The Rank Version of von Neumann's Ratio Test for Randomness. **Journal of the American Statistical Association**, v. 77, pp. 40-46, 1982.
- BAUMER, O.W. Prediction of soil hydraulic parameters. In: **WEPP Data Files for Indiana**. SCS - National Soil Survey Laboratory. 1990.
- BUISHAND T.A. Some Methods for Testing the Homogeneity of Rainfall Records. **Journal of Hydrology**, 58, pp.11-27, 1982.
- BUISHAND T.A. Tests for Detecting a Shift in the Mean of Hydrological Time Series. **Journal of Hydrology**, 73, pp. 51-69, 1984.
- CAMPOS, J.E.G., DARDENNE, M.A. Estratigrafia e Sedimentação da Bacia Sanfranciscana: Uma revisão. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 27, n. 3, pp. 269-282, 1997.

CBHSF. Comitê da Bacia Hidrográfica do rio São Francisco. **Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco 2016-2025**. RP2 - Diagnóstico Consolidado da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. Brasília, 2015. p.489.

CBHSF. Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. **RF3-Resumo executivo do Plano de Recursos Hídricos da bacia hidrográfica do rio São Francisco 2016-2025**. Alagoas, 2016. p.300.

COELHO, A. L. N. Geomorfologia Fluvial de Rios Impactados por Barragens. **Revista Caminhos de Geografia**, v. 9, pp. 16 – 32, 2008.

CREECH, C.T., SIQUEIRA, R.B., SELEGEAN, J.P., MILLER, C. Anthropogenic impacts to the sediment budget of São Francisco River navigation channel using SWAT. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, Vol. 8, pp.140-157, 2015.

DARDENNE, M.A., SCHOBENHAUS, C. **Metalogênese do Brasil**. Editora Universidade de Brasília, 392 p. 2001.

DELANEY, P. **Gem stones of Brasil. Geology et occurrence**. Ouro Preto: REM, 125 p., 1996.

DLR (Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt) - SRTM. Disponível em:

<https://dlr.de/caf/de/desktopdefault.aspx/tabid-5515/9214_read-17716>. Acesso em: jul. 2017.

ELETROBRAS. **SIPOT - Sistema de Informações do Potencial Hidrelétrico Brasileiro**, 2014. Disponível em:

<<http://www.eletrobras.com/elb/data/Pages/LUMIS21D128D3PTBRIE.htm>>. Acesso em fev. 2018.

EMBRAPA. **Solos**. Disponível em: <<http://www.solos.cnptia.embrapa.br>> Acesso em out. 2015.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2a ed. Rio de Janeiro, RJ: Embrapa Solos, 306p. 2006.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. Disponível em:

<<http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/en/>>. Acesso em mar. 2017.

FERNANDES, J.G. **Estimativa de Vazão e Produção de Sedimentos na bacia hidrográfica do rio São Francisco, utilizando o modelo SWAT**. 2015. Tese (Doutorado em Geografia) -

Universidade Federal do Pernambuco, Recife-PE, 2015.

FERNANDES, P.E.C.A. Geologia. In:BRASIL, MINISTÉRIODAS MINAS E ENERGIA,Projeto RADAMBRASIL FolhaSD 23 Brasília: **geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra**. Rio de Janeiro, p. 25-204, 1982.

GASPAR M.T.P., CAMPOS, J.E. O Sistema Aquífero Urucuia. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 37 n. 4, pp. 216-226, 2007.

GASPAR, M. **Sistema Aquífero Urucuia**: Caracterização Regional e Propostas de Gestão. Tese de Doutorado. Universidade de Brasília. Instituto de Geociências. 214 p. Brasília, 2006.

GRAYSON, R. B., ARGENT, R. M., NATHAN, R. J., MCMAHON, T. A., MEIN, R. **Hydrological Recipes**: Estimation Techniques in Australian Hydrology. Australia: Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology, 125 p, 1996.

GUERRA, A. M. **Processos de carstificação e hidrogeologia do grupo Bambuí na região de Irecê-Bahia**. 1986. Tese (Doutorado em Geologia). Universidade de São Paulo, 1986.

GUIMARÃES, V.S., BRAGANÇA, A.F.M.S. **Subprojeto 4.7.A - Proposta de Complementação da Rede Hidrometereológica da Bacia do Rio São Francisco e sua Zona Costeira**. ANA/GEF/PNUMA/OEA, Brasília-DF, 2003.

HOLANDA, F.S.R., ISMERIN, S.S., ROCHA, I.P., JESUS, A.S., FILHO, R.N.A., MELLO JÚNIOR, A.V. Environmental perception of the São Francisco River in epopulation in regards to flood impact. **Journal of Human Ecology**, v. 28, pp. 37-46, 2009.

ISRIC - International Soil Reference and Information Center.Disponível em:<http://geonode.isric.org/layers/geonode:soter_lac_map_unit>. Acesso em mar. 2017.

JARVIS A., REUTER, H.I., NELSON, A., GUEVARA, E. **Hole-filled seam less SRTM data V4**, International Centre for Tropical Agriculture (CIAT), 2008.

KAEMPFL, F.P. Free Pascal. Disponível em: <<https://www.freepascal.org>>. Acesso em out. 2016.

KENDALL, M. G., STUART, A. **The Advanced Theory of Statistics**. American Statistical Association, v. 2, p. 525–528, 1963.

KUNDZEWICZ, Z. W., ROBSON, A. **Detecting trend and Other Changes in Hydrological Data, World Climate Programme-Water, World Climate Programme Date and**

Monitoring, WCDMP-45, WMO/TD n° 1013, 158 p, 2000.

LETA, O.T.; VAN GRIENSVEN, A.; BAUWENS, W. Effect of single and multisite calibration techniques on the parameter estimation, performance, and output of a SWAT model of a spatially heterogeneous catchment. **Journal of Hydrology Engineering**, 22:05016036, 2017.

LIMA, E.A.M., LEITE, J.F. **Projeto estudo global dos recursos mineiras da Bacia Sedimentar do Parnaíba**: integração geológica-metalogenética. Recife. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, Relatório Final da Etapa III, 212 p., 1978.

MANN, H. B. Nonparametric Tests Against Trend. **Econometrica**, v. 13, n. 3, p. 245–259, 1945.

MATEUS A.C.F. An R implementation of several Randomness Tests. In: SIMOS, T. E., KALOGIRATOU, Z., MONOVASILIS, T. (eds.), **AIP Conf. Proc.** **1618**. pp.531–534, 2014.

MEDEIROS, P.R.P. **Aporte fluvial, transformação e dispersão da matéria em suspensão e nutrientes no estuário do Rio São Francisco, após a construção da Usina Hidroelétrica do Xingó (AL/SE)**. 2003. Tese (Doutorado em Geociências) - Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ, 2003.

MMA(a). MacroZEE-BHSF. Atualização e Complementação do Diagnóstico do Macrozoneamento Ecológico-Econômico da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. **Relatório da Atualização e Complementação do Diagnóstico do Meio Físico-Biótico da BHSF**. Revisão Final - Tomo I. Brasil, 2016.

MMA(b). MacroZEE-BHSF. Atualização e Complementação do Diagnóstico do Macrozoneamento Ecológico-Econômico da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. **Relatório da Atualização e Complementação do Diagnóstico do Meio Físico-Biótico da BHSF**. Revisão Final - Tomo II. Brasil, 2016.

MMA(c) - Ministério do Meio Ambiente. Página de acesso a dados. Disponível em: <<http://mapas.mma.gov.br/i3geo/datadownload.htm>>. Acesso em: out. 2015.

MME - DNPM. **Anuário Mineral 1996**. Brasília, DNPM. Disponível em: <http://www.dnpm.gov.br/assuntos/aopublico/anuariomineral/arquivos/ANUARIO_MINERAL_2010.pdf>. Acesso em jul. 2016.

MOORE, G. H., WALLIS, W. A. (1943). Time Series Significance Tests Based on Signs of Differences, **Journal of the American Statistical Association**, v. 38, pp. 153–154, 1943.

MORIASI, D.N., ARNOLD, J.G., VAN LIEW, M.W., BINGNER R.L., HARMEL R.D., VEITH, T.L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASABE**, St. Joseph, v. 50, n.3, pp. 885-900, 2007.

MT (2013).Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil. **Plano Hidroviário**

Estratégico - PHE. Disponível em:

<<http://bibspi.planejamento.gov.br/handle/iditem/610?show=full>>

MYERS, N., MITTERMEIER, R.A., MITTERMEIER, C.G., FONSECA, G.A.B., KENT, J. Biodiversity hotspots for conservation priorities.**Nature**. v. 403, pp. 853-858, 2000.

NASA.**Jet Propulsion Laboratory (JPL)** - National Aeronautics and Space Administration (NASA).Disponível em: <<https://www.jpl.nasa.gov/news.php?release=2014-321>>. Acesso em out. 2014.

NKIAKA, E., NAWAZ, N.R. & LOVETT, J.C. Effect of single and multi-site calibration techniques on hydrological model performance, parameter estimation and predictive uncertainty: a case study in the Logone catchment, **Lake Chad basin. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment Journal**, 32: 1665. 2018.

NUNES, F. M. S., FARIAS, C. A. S., MARTINS, W. A., ALMEIDA, R. N., LEITE, J. C. A. Aplicação do TankModel para estimativa mensal de vazões na bacia hidrográfica do rio Piancó. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 9, n. 1, pp. 343-349, 2014.

OLIVEIRA, A.M. de. **Subprojeto 1.2. B - Estudo Hidrodinâmico-sedimentológico do baixo São Francisco, Estuário e zona costeira adjacente-AL/SE**. ANA/GEF/PNUMA/OEA, Maceió-AL, 2003.

PETTIT, A.N. A non-parametric approach to the change-point problem.**Appl.Statist.**, v.28, pp. 126-135, 1979.

POHLERT, T. **trend: Non-Parametric Trend Tests and Change-Point Detection. R packageversion 1.1.1**. 2018. Disponível em: <<https://CRAN.R-project.org/package=trend>>

PRUSKY, J. **Modelo para Minimização de Impactos Socio-Econômicos e Ambientais Decorrentes da Erosão do Solo**. Viçosa: GPRH/UFV, 2002.

RAMOS, M.L.S., PAIXÃO, M.M.O.M. Disponibilidade hídrica de águas subterrâneas -

Produtividade de poços e reservas explotáveis dos principais sistemas aquíferos. **Plano Diretor do Recursos Hídricos da Bacia do Rio São Francisco**. Belo Horizonte: Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM). 41p, 2003.

RAMOS, M. M. **Subprojeto 4.3 - Quantificação e Análise da Eficiência do Uso da Água Pelo Setor Agrícola na Bacia do São Francisco**. ANA/GEF/PNUMA/OEA, Viçosa, MG, 2003.

RAMOS, S.O., ARAÚJO, H.A., LEAL, L.R.B., DA LUZ, J.A.G., DUTTON, A.R. Variação temporal do nível freático do aquífero cárstico de Irecê-Bahia: contribuição para uso e gestão das águas subterrâneas no semi-árido. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 37, n. 4, pp. 227-233, 2007.

ROUHIER, L.; LE, L.M.; GARAVAGLIA, F.; LE, M.N.; HENDRICKX, F.; MONTEIL, C.; RIBSTEIN, P. Impact of mesoscale spatial variability of climatic inputs and parameters on the hydrological response. **Journal of Hydrology**, 2017. pp.13–25.

SAXTON, K.E., RAWLS, W.J. Soil Water Characteristics Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. Madison (USA). **Journal Soil Science Society of America**, v. 70, pp. 1569-1578, 2006.

SIEGMUND-SCHULTZE, M., RODORFF, V., KOPPEL, J., SOBRAL, M.C. Paternalism or participatory governance? Efforts and obstacles in implementing the Brazilian water policy in a large watershed. **Land Use Policy**, v. 48, pp. 120-130, 2015.

SILVA, A.B. et al. **Pesquisa e avaliação de recursos hídricos subterrâneos em "karsts" por sensores remotos - Relatório Final**. CETEC/CNPq. Belo Horizonte-MG, 1981.

SUGAWARA, M.; WATANABE, E.; OZAKI, E.; KATSUYAMA, Y. Tank Model Programs for Personal Computer and the Way to Use (Second Report). Reporter nº 556.16 : 627.51: 681.3, **National Research Center for Disaster Prevention**, Japan. 1986. p.200.

SUGAWARA, M. Tank Model. In: SINGH, V.P. (ed.) Computer Models of Watershed Hydrology. Highlands Ranch: **Water Resources Publications**, Colorado, pp. 165-214, 1995.

TAMU, Texas A&M University (TAMU) - **Global Weather Data - GlobalWeather**. Disponível em: <<https://globalweather.tamu.edu>>. Acesso em jun. 2017.

TAMU, Texas A&M University (TAMU) - **Soil & Water Assessment Tool (SWAT) - Softwares**. Disponível em: <swat.tamu.edu/softwares/>. Acesso em jul. 2013.

TEAM, R. Core. R Foundation for Statistical Computing; Vienna, Austria: 2014. **R: A language and environment for statistical computing**, p. 2013, 2015.

TRAPLETTI, A., HORNIK, K., LEBARON, B., HORNIK, M. K. Package ‘tseries’. **Version 0.10-45**, v. 4, 2018.

USEPA, **Visão Geral do Programa: Total Máximo de Cargas Diárias (TMDL)**. 2017. Acesso em: 2017. Disponível em: <<https://www.epa.gov/tmdl/program-overview-total-maximum-daily-loads-tmdl>>

USGS, **Earth Resources Observation and Science (EROS) Center Archive - U.S. Geological Survey (USGS) - Earthexplorer**. Disponível em:<<https://earthexplorer.usgs.gov>>. Acesso em mar. 2017.

van ENGELN, V.W.P., BATJES, N. H., DIJKSHOORN, J. A., HUTING, J. R.

M. **Harmonized Global Soil Resources Database**. Final Report. 2005/06. Disponível em: <<http://www.isric.org/documents/document-type/isric-report-200506-harmonized-global-soil-resources-database-final-report>> Acesso em jul. 2017.

VASCONCELLOS, S.M. Desenvolvimento de um índice de umidade do solo derivado da versão distribuída do Tank Model. **Dissertação** (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Básico). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017. p.104.

WANG, S., ZHANG, Z.; SUN, G.; STRAUSS, P.; GUO, J.; TANG, Y.; YAO, A. Multi-site calibration, validation, and sensitivity analysis of the MIKE SHE Model for a large watershed in northern China. **Hydrology Earth System Sciency Journal**, 16:4621–4632, 2012.

WI, S.; YANG, YCE.; STEINSCHNEIDER, S.; KHALIL, A.; BROWN, C.M. Calibration approaches for distributed hydrologic models in poorly gaged basins: implication for streamflow projections under climate change. **Hydrology Earth Systems Sciency Journal**, 19:857–876, 2015.

WINCHELL, M., SRINIVASAN, R., DI LUZIO, M., ARNOLD, J.G. **Arcswat Interface for SWAT2012**: User’s Guide. Blackland Research Center, Texas AgriLife Research, College Station, 1-464, 2013.

WISCHMEIER, W.H., JOHNSON, C.B., CROSS, B.V. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. **Journal Soil Water Conservation**, v. 26, pp. 189-193, 1971.

WOLFOWITZ, W. A., WOLFOWITZ, J. An exact test for randomness in the non-parametric case based on serial correlation. **Annual Mathematical Statistics**, 14. pp. 378-388, 1942.

XAVIER, A. C., KING, CAREY W. S., BRIDGET R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980-2013), **International Journal of Climatology**, Vol 36, Issue 6, p. 2644-2659, 2016.

CAPÍTULO 4 - MODELAGEM DIGITAL DOS SOLOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO

4.1. Introdução

A adaptação dos ambientes, pelo homem, traz profundas alterações aos mesmos no processo reconhecido como evolução humana. Desde o início da agricultura, comumente datado de 11.000 AC, o homem teve que lidar com as qualidades e limitações dos solos (BREVIK; HARTEMINK, 2010). Portanto, o desenvolvimento de uma abordagem científica, multidisciplinar, para conhecimento do solo continua sendo a principal demanda da agenda científica da área. O desenvolvimento e complexificação das sociedades apenas intensificou a crescente necessidade de um planejamento adequado e sustentável das atividades humanas, o entendimento dos ecossistemas e, principalmente, da prestação de serviços ambientais por esses ambientes tornou-se imperativo (SANCHEZ *et al*, 2009) em escala global.

Historicamente, as primeiras informações espaciais registradas sobre as propriedades do solo eram os relatos escritos que ligavam certos atributos do solo aos documentos de propriedade para determinados pedaços de terra. Esses relatos foram utilizados no sistema feudal da Europa Ocidental, na Arábia, do século VI ao século XV, e na China, de aproximadamente 300 a 1951 DC (MILLER; SCHAEZTL, 2014).

O primeiro mapeamento real dos atributos do solo foi realizado na Europa no início do século XVIII para fins de avaliação da terra e tributação (BREVIK; HARTEMINK, 2010). Esses primeiros mapas de solo usavam tipicamente mapas de contorno de fronteiras políticas como seus mapas de base (MILLER; SCHAEZTL, 2014). Posteriormente, na segunda metade do século XIX, os primeiros cientistas do solo estavam centrados em disciplinas como a agro-química e a geologia. Sua abordagem à ciência do solo foi consequentemente influenciada por sua formação cultural (CALZOLARI; FILIPPI, 2015).

Assim, a gestão ambiental, enquanto meio de promoção do desenvolvimento sustentável encontra caráter prático na gestão de solos e bacias hidrográficas. Segundo Vieira (1995), tais áreas podem contribuir para a implementação de estratégias que compatibilizem viabilidade econômica, equidade social, autonomia política e, sobretudo, prudência ecológica. Constanza (1994) critica os atuais sistemas de tomada de decisão baseados em normas, por sua ineficiência na gestão de recursos ambientais com vistas à sustentabilidade diante da incerteza quanto aos valores futuros e aos impactos de longo prazo. O sistema baseado em modelos preenche uma

necessidade por informações detalhadas e acessíveis sobre o solo, que possuem utilidades práticas tais como a estimativa global do carbono orgânico do solo ou a modelagem da produtividade agrícola.

Por conseguinte, tendo em vista as necessidades citadas acima de informações espaciais sobre os parâmetros da água do solo se tornarão cada vez mais críticas em áreas afetadas pelas mudanças climáticas (HENGL *et al*, 2017). O presente trabalho objetiva denotar como se deu a evolução dos conceitos que embasam a modelagem hidrossedimentológica, tendo em vista o estabelecimento das práticas que, na atualidade, formam o chamado ‘estado da arte’ em tal campo do conhecimento, bem como suas perspectivas para o futuro. Tais conceitos serão aplicados na modelagem da condutividade hidráulica dos solos saturados (Ks) em uma grande bacia hidrográfica brasileira, a do rio São Francisco.

Tal preocupação insere-se na construção de conhecimento sobre o país, pois, conforme aponta Lima *et al.* (2013), no caso do Brasil, apesar de suas dimensões continentais, o conhecimento sobre os solos (e seu comportamento hidrológico) é ainda muito limitado.

4.2. Revisão de Literatura

Historicamente, no Brasil, o primeiro levantamento de solo foi realizado no início da década de 1950 por Mendes e colaboradores, para interpretações da fertilidade do solo, conservação e manejo do mesmo para uso agrícola em Itaguaí, no Rio de Janeiro. Nos anos 60, a elaboração do mapa de solos das regiões norte e central marcou o início de um novo período de treinamento de campo dos cientistas do solo no Brasil e nos Estados Unidos, contribuindo para um aumento substancial da mão-de-obra do solo. (SANTOS; SANTOS, 2007).

Nos anos 80, a EMBRAPA desenvolveu o precursor do Banco de Dados do Solo Brasileiro (BSD), o SisSolos, que chegou a armazenar 11.533 perfis de solos. Um novo mapa de solo do Brasil foi compilado em 2011, com base em informações de campo fornecidas por levantamentos de solo em grande escala, realizadas no período de 1981-2001 com melhorias de qualidade cartográfica e taxonomicamente atualizadas (*idem*).

As principais informações cartográficas nacionais disponíveis são o mapa de solos do Brasil em escala de 1:5.000.000 (EMBRAPA, 2011), as cartas pedológicas do Projeto Radam Brasil em escala de 1:1.000.000 [...] e o levantamento de solos realizado pelo IBGE, em escala 1:250.000, disponível para dez estados da federação (SANTOS; SANTOS, 2007). Um levantamento é a principal fonte de informação espacial do solo e é muito útil no apoio às

decisões de uso da terra, especialmente para fins agrônômicos. Os primeiros mapas de solos eram desejáveis para fins de avaliação da terra para tributação, planejamento agrônômico (Brevik e Hartemink, 2010) e até mesmo em operações militares (Brevik et al., 2015a).

Para suas confecções foram realizadas amostragens, usando métodos e ferramentas para a coleta e descrição de solos, seguidos pela análise das amostras no laboratório. Essa foi a maneira com a qual inúmeros projetos de levantamento e de pesquisa de solos geraram, ao longo de décadas, um grande volume de dados legados, literalmente ‘deixados para as próximas gerações’ (Rosa; Vasques, 2017).

No entanto, a continuidade do levantamento de solo no Brasil foi comprometida devido à quantidade mínima de investimento do governo no setor (Chagas et al, 2017), bem como os mapas de solo ao longo do tempo foram limitados pelas escalas cartográficas (e, portanto, nível de detalhamento) dos mapas de base disponíveis (Miller e Schaetzl, 2014). A grande extensão territorial, desigualdades regionais, falta de recursos materiais e humanos e insuficiente apoio institucional forçaram o país a optar pela execução de pesquisa generalizada em pequena escala.

Dessa forma, 35% dos solos brasileiros e 17 dos 27 estados tinham sido cobertos por mapas de solo em várias escalas intermediárias (1:100,000-1:600,000) e cobertura completa do país encontra-se disponível em níveis exploratórios e esquemáticos (escalas 1:100,000 e 1:5000,000). Assim, mesmo com os desenvolvimentos recentes, zonas extensas ainda carecem de informações completas sobre o solo em escalas e níveis de levantamento adequados, necessários para enfrentar os problemas atuais de uso, manejo, conservação, prevenção e recuperação de áreas degradadas agrícola e não-agrícolas (Santos; Santos, 2007).

Rosa et al. (2018) mostram ainda que, mesmo os dados já produzidos, podem acabar não sendo aproveitados, pois já existe uma grande quantidade de dados de solo levantados como parte de pesquisas e ainda não estão totalmente consistidos e disponíveis em um repositório nacional. A maioria destes conjuntos de dados deram origem à literatura publicada, geralmente como um único artigo, e os dados primários não estão disponíveis para outros pesquisadores.

Samuel-Rosa e Vasques (2017) corroboram com a tese, denotando que a geração de informações atualizadas do solo para todo o Brasil requer a manipulação de um grande volume de dados, os quais idealmente deveriam estar organizados e disponíveis para acesso em bases de dados públicas e/ou privadas abertas.

Os levantamentos de solos podem ser descritos por duas abordagens metodológicas: o Mapeamento Digital de Solos e a metodologia clássica (ou tradicional). Esta última, considera o solo como resultado da interação entre cinco fatores: clima, organismos, relevo, material de origem e tempo. Na abordagem tradicional, a taxonomia de solos é o modelo usado pelo pedólogo para criar e distinguir as classes de solos e estabelecer seus limites (Lima et al, 2013), baseando-se nas relações entre tipos de solos e seus respectivos ambientes.

A expansão do uso do conhecimento do solo para abordar questões além da produção, como o planejamento do uso da terra, preocupações ambientais, segurança alimentar, segurança energética, segurança hídrica e saúde humana requer novos métodos para comunicar o que se sabe sobre os solos a serem mapeados (Sanchez et al., 2009).

Vários aspectos do mapeamento tradicional vêm sendo questionados, com discussões acerca caráter discreto dos mapas tradicionais em oposição ao modelo contínuo, considerado mais realístico (Lima *et al*, 2013).

Nesse contexto, surge o mapeamento Digital do Solo, que pode ser definido como a criação e manipulação de sistemas de informação espacial do solo por meio de modelos numéricos usados para inferir variações espaciais e temporais das propriedades e tipos de solo a partir da observação e conhecimento do próprio solo e das variáveis ambientais correlacionadas (LAGACHERIE, 2008).

A implicação de fazer uso dos métodos tradicionais em escalas não perfeitamente adequadas acaba por prejudicar a construção de conhecimento sobre as características físicas do país, pois, como mostram Lima *et al.* (2013), os métodos de levantamento de solos tradicionais são demorados e não apresentam adequadamente as informações demandadas pelos diferentes usuários.

Há também problemas com precisão da informação, confiabilidade das interpretações qualitativas e dificuldade de extrapolação da informação obtida para outras áreas. Entretanto, essas escalas clássicas não são compatíveis com as atuais demandas, e os mapeamentos em detalhe não representam cobertura significativa do território nacional e estão vinculados a regiões restritas. O mapeamento digital de solos, como apontam Santos e Santos (2007), é visto como uma oportunidade para recuperar o programa de mapeamento de solos inacabado no Brasil.

Apesar da crescente aplicação do mapeamento digital de solos, mais pesquisas são necessárias nas regiões brasileiras, especialmente para a seleção de covariáveis, técnicas de

amostragem, métodos preditivos, validação e precisão dos produtos. Além disso, são necessários estudos em condições ambientais específicas, como áreas de encostas ou o bioma Amazônia, conforme aponta Chagas et al. (2017).

Tendo em vista que diversas são as limitações para a obtenção de informações de solos e seus atributos químicos, físicos e biológicos, por exemplo: o custo elevado dos levantamentos; a grande extensão das áreas a serem mapeadas; e, por vezes, a dificuldade de acesso a determinadas regiões, como apontam Lima et al. (2013), citando vários estudos.

Além disso, o mapeamento do solo exige sistemas de classificação que permitam a comunicação eficiente das informações mapeadas de uma maneira facilmente compreensível. Por sua vez, os sistemas de classificação exigem a compreensão do sistema do solo (Marbut, 1922) e a obtenção dessa compreensão incluiu a observação de padrões espaciais no campo e o desenvolvimento de modelos de solo (Wilding, 1994).

Há uma necessidade cada vez mais urgente de que tais dificuldades sejam superadas, pois informações espaciais precisas e detalhadas sobre o solo são essenciais para modelagem ambiental, avaliação de risco e tomada de decisão.

Uma das soluções desenvolvidas pela comunidade científica é o uso de dados de Sensoriamento Remoto como fontes secundárias de informação no mapeamento digital de solos. Tal método tem sido considerado econômico e consome menos tempo se comparado às abordagens tradicionais (Forkuor et al, 2017).

Conforme Calzolari e Filippi (2015), tal pesquisa pode interagir com as novas possibilidades oferecidas entre outras pelos novos métodos de detecção e análise remota, mapeamento digital de solos, geoestatística, modelagem avançada. O mapeamento digital fornece tais informações espaciais de unidades de mapa de solo e suas características. As relações solo-paisagem são a base para analisar os padrões de ocorrência do solo através de uma combinação de atributos do terreno e formas de superfície, que influenciam diretamente na gênese e classificação (Chagas et al, 2017).

Caten et al (2012) mostra que, mesmo num contexto global, o solo é cada vez mais reconhecido como tendo um importante papel nos ecossistemas, assim como para a produção de alimentos e regulação do clima global. Num contexto prático, de acordo com Brevik et al (2015), o mapeamento, a classificação e a modelagem pedológica do solo têm sido importantes

impulsionadores do avanço da compreensão do mesmo desde os primeiros dias de seu estudo científico.

O aumento da conscientização sobre a importância do papel do solo em sistemas ambientais está impulsionando novas demandas por melhores mapas de solo (Indorante et al., 1996; Miller, 2012). Assim, a necessidade de acelerar o processo de mapeamento, melhorando a qualidade, eliminando a subjetividade e minimizando os custos, torna fundamental a busca por novos métodos. Nesse contexto, o Mapeamento Digital de Solos apresenta um grande potencial, podendo se tornar uma ferramenta capaz de vir a suprir a falta de informação pedológica (Lima et al, 2013).

O Mapeamento Digital de Solos, faz uso intensivo da Pedometria, que é a disciplina da Ciência do Solo dedicada ao estudo da variação espacial e temporal do solo, lançando mão de tecnologias da informação (TIs) para a coleta, armazenamento, manipulação, modelagem e distribuição de dados. O insumo básico de uma aplicação pedométrica são os dados do solo, que adquirem o papel de variáveis de resposta, ou dependentes.

As variáveis de resposta são aquelas variáveis que se deseja compreender ou estimar, ou seja, as propriedades, características, atributos do solo, como o conteúdo de argila e a classe taxonômica (Vasques, 2017) no caso do presente estudo será realizado um exercício de estimativa da condutividade hidráulica do solo saturado na bacia hidrográfica do rio São Francisco.

Um SIG (Sistema de Informação Geográfica) que trabalhe com gestão de dados deve fornecer as características mínimas necessárias para as etapas posteriores de modelagem dos dados. No caso da pedometria, as mesmas envolvem a análise dos dados do solo e da sua relação com os componentes da paisagem para produzir modelos de representação do comportamento espacial e/ou temporal; modelos de predição dos seus atributos; modelos das relações solo-paisagem, enfim, para permitir o entendimento da sua formação e distribuição (Vasques et al, 2017).

Franco et al (2018) afirmam que uma das utilidades desse método é que a aplicação de técnicas pedométricas envolvendo relações solo-paisagem, informações disponíveis em levantamentos convencionais de solos, fontes de informação digital topográfica e ferramentas de agricultura de precisão, pode ser apropriada para delimitar tipos de solo em campos agrícolas. Essa estratégia pode permitir otimizar o uso de insumos (sementes, fertilizantes e pesticidas) e as

práticas de manejo do solo e da cultura, mitigando o risco ambiental no atual setor agrícola, aumentando a produtividade e o lucro. Além disso, poderá oferecer a estrutura de dados de solos necessária a muitos modelos hidrológicos distribuídos, vindo a contribuir de modo decisivo na gestão da produção e qualidade das águas dos rios.

O esforço atual para superar as limitações passadas do mapeamento do solo vem agora utilizando novos dados e novas técnicas de modelagem pedológica. A principal desvantagem dessa abordagem é que um grande número de amostras de solo deve ser coletado e analisado para representar adequadamente a variabilidade espacial (Fraisse et al., 2001).

Em face da demanda permanente por mapeamento pedológico para planejamento da gestão e ocupação racional das terras no Brasil, as limitações para aquisição de dados de solos têm levado ao estudo de técnicas de mapeamento digital de solos, cuja principal abordagem é a predição das classes ou propriedades de solos por meio de modelos matemáticos e seu mapeamento digital de forma contínua e espacial, de acordo com Dias et al (2016). Pesquisadores em ciência do solo estão sendo demandados a gerar informações em diferentes resoluções espaciais e com qualidade associada, conforme Canet (2012).

Para reduzir a lacuna entre a demanda e a disponibilidade de dados do solo, o Centro Internacional de Informações de Referência do Solo - *World Soil Information* (ISRIC) lançou, entre outros, um sistema Global de Informações sobre Solos chamado "SoilGrids". A primeira versão do SoilGrids (previsões em resolução espacial de 1 km lançada em 2014) era, na época, uma 'prova de conceito', demonstrando que compilações globais de perfis de solo podem ser usadas em uma estrutura automatizada para produzir previsões espaciais completas e consistentes das propriedades e classes do solo (Hengl et al, 2017). Em sua versão mais recente, o procedimento foi em muito aperfeiçoado, além da escala espacial que agora conta também com a resolução de 250m (Hengl et al, 2017).

O estado atual das necessidades e desafios dos modelos é um reconhecimento de que a necessidade de informações espaciais do solo continua a crescer (Brevik et al, 2015). Melhorar a tecnologia continua a tornar os melhores mapas de solos mais acessíveis. A tecnologia já existente possibilita a criação de mapas com maior cobertura global, maior precisão para propriedades específicas do solo e resolução espacial mais fina (Omuto et al., 2013). Além disso, aplicando modelos de computador, os mapas podem ser produzidos com melhor consistência

espacial. Se bem documentado, o processo de produção dos mapas pode ser reproduzido, princípio fundamental no trabalho científico.

Outra ferramenta imprescindível ao mapeamento digital de solos é a geoestatística, que é um subconjunto de estatísticas especializadas em análise e interpretação de dados geograficamente referenciados (HENGL, 2007), sendo usada na análise de dados de campo. Outros usos são a exploração da variação espacial em dados de sensoriamento remoto, quantificação do ruído nas imagens e filtragem, melhoria na geração de DEMs e simulações para otimizar a amostragem espacial, seleção de resolução espacial para dados de imagens e seleção de tamanho de suporte para dados terrestres, conforme demonstrado por Kyriakidis et al. (1999) e Atkinson e Quattrochi (2000).

A previsão geoestatística é baseada na aplicação de técnicas quantitativas e estatísticas enquanto que as abordagens tradicionais baseiam-se no uso de conhecimento empírico. No caso da previsão geoestatística, as decisões mais importantes são de outra natureza, tais como considerar a posição espacial ou não, seja para transformar ou usar os dados originais, considerar os efeitos da multicolinearidade ou não, sendo assim um sistema baseado em especialistas (Hengl, 2007).

A alterabilidade espacial de variáveis ambientais é caracterizada por processos complexos e simultâneos trabalhando por um longo período de tempo. Tendo isso em vista, Hengl (2007) aponta que o primeiro passo para o mapeamento geoestatístico bem-sucedido de variáveis ambientais é entender as fontes de variabilidade nos dados. A variabilidade nos dados é uma soma de dois componentes: (a) a variação espacial natural e (b) o ruído inerente, principalmente os erros de medição (Burrough; McDonnell, 1998). Essa, por sua vez, é determinada por um conjunto finito de entradas e seguem exatamente alguma lei física conhecida.

Os princípios físicos basilares aqui estudados são a isotropia, ou seja, substâncias que possuem as mesmas propriedades físicas independentemente da direção em que estejam executando seu movimento, e a anisotropia, que é a característica que uma substância possui, onde uma de suas propriedades físicas varia com a direção. Normalmente os elementos estudados pelas geociências são casos de anisotropia, o que no contexto da Geoestatística significa haver direções privilegiadas que condicionam a gênese do fenômeno (Berveglieri et al, 2011).

A relação entre a característica de interesse e o ambiente físico é tão complexa que não pode ser modelada exatamente (Heuvelink; Webster, 2001), apenas estimada a partir de um

modelo que faça uso de medidas de campo reais da variável de destino. Isso pode ser chamado de estimativa indireta ou não determinística (Hengl, 2007).

Historicamente, a krigagem originou-se na indústria de mineração no início dos anos 1950, como um meio de melhorar a estimativa de reservas de minério. A ideia original veio dos engenheiros D. G. Krige e do estatístico H. S. Sichel e publicada em Krige (1951). Porém, foi o matemático francês G. Matheron quem derivou as fórmulas e basicamente estabeleceu todo o campo da geoestatística linear (Hengl, 2007), ao introduzir na análise de dados pontuais a derivação e plotagem das chamadas semivariâncias.

Hengl (2007) explica como funciona tal método, apontando que, nessa técnica de análise, o que se espera ver é que as semivariâncias são menores a uma distância menor e depois se estabilizam a alguma distância. Isso pode ser interpretado da seguinte forma: os valores de uma variável-alvo são mais semelhantes em distâncias mais curtas, até uma certa distância em que as diferenças entre os pares são menos iguais à variância global (efeito de autocorrelação espacial).

Tal fenômeno pode ser considerado como resultado da difusão - um movimento aleatório que faz com que um sistema se decomponha em condições uniformes. Pode-se argumentar que, se houver um processo físico por trás de um recurso, deve-se modelá-lo usando uma função determinística, em vez de tratá-lo como um componente estocástico. No entanto, a difusão é um movimento aleatório para que haja um argumento meta-estatístico para tratá-lo, este deverá comportar um componente estocástico. Os variogramas são comumente ajustados por estimativas de mínimos quadrados iterativos e reescritos, em que os pesos são determinados com base no número de pares de pontos ou com base na distância (Hengl, 2007).

Uma vez que se calculou um variograma experimental, pode-se ajustá-lo usando alguns dos modelos de variograma estabelecidos, tais como linear, esférico, exponencial, circular, Gaussiano, Bessel, poder e similar (Hengl, 2007).

Feita a análise, a variável-alvo é considerada estacionária se vários variogramas de amostra forem muito similares (constante), o que é chamado de estacionariedade de covariância. Caso contrário, se os variogramas diferirem muito, diz-se que as propriedades inerentes são não-estacionárias. Em princípio, os pressupostos da krigagem são de que a variável alvo é estacionária e que tem uma distribuição normal, o que é provavelmente a maior limitação da krigagem. Também é importante observar que há uma diferença entre o fator de intervalo e o intervalo de dependência espacial, também conhecido como o intervalo prático (Hengl, 2007).

É a técnica que tem se destacado, a regressão por krigagem, mostrando um potencial para se tornar a técnica de mapeamento mais popular usada por cientistas ambientais porque é fácil de usar e oferece um desempenho melhor, levando praticamente tudo em consideração, em relação a outros métodos concorrentes. Porém, como ocorre com qualquer modelo matemático que tenha uma conotação física, e especialmente com modelos baseados em estimativas, existe uma série de problemas e indicações que devem ser levados em conta na decisão pela regressão por krigagem. Primeiramente, a mesma depende completamente da qualidade dos dados. Se os dados vierem de fontes diferentes e tiverem sido amostrados usando um design tendencioso ou não representativo, as previsões podem ser ainda piores do que com técnicas simples de previsão mecanicista (Hengl, 2007).

Além disso, para modelagem de regressão, o espaço de recurso multivariado deve ser bem representado em todas as dimensões. Para modelagem de variograma, um número adequado de pares de pontos deve estar disponível em vários espaçamentos. Na literatura, Webster e Oliver (2001) recomendam pelo menos 50 e preferencialmente 300 pontos para estimativa de variograma. Neter et al. (1996) recomenda pelo menos 10 observações por preditor para regressão múltipla.

Outra limitação é o fato de que tanto os parâmetros do modelo de regressão quanto os parâmetros da função de covariância precisam ser estimados simultaneamente, o que gera uma contradição metodológica. Lark et al. (2005) propuseram uma abordagem iterativa de Máxima Verossimilhança Restrita (REML) para fornecer uma estimativa não tendenciosa dos coeficientes de variograma e regressão, baseada em matrizes $n \times n$.

É também de suma importância para um desempenho satisfatório que os pontos sejam bem distribuídos nas bordas do espaço de feição e que eles sejam distribuídos simetricamente em torno do centro do espaço de feições (Hengl et al., 2004b). Além disso, mapas auxiliares devem ter um relacionamento físico constante com a variável-alvo em todas as partes da área de estudo. Um exemplo é um único NDVI como preditor de matéria orgânica de solo superficial. Se um campo agrícola acaba de ser colhido (NDVI baixo), o mapa de previsão irá (incorretamente) mostrar um conteúdo muito baixo de matéria orgânica dentro do campo de cultivo (Hengl, 2007).

A Regressão por krigagem não foi adaptada para se ajustar aos dados localmente, com sítios arbitrários para a regressão, como pode ser feito com a krigagem com janela móvel (Walter et al., 2001). Conclui-se que uma série de cuidados devem ser tomados ao ajustar os modelos

estatísticos - hoje, modelos complexos e grandes quantidades de preditores podem ser usados para que o modelo possa ajustar os dados quase 100%. Mas há uma distinção entre a qualidade do ajuste e o verdadeiro sucesso da previsão, que não pode ser realmente avaliada sem uma validação independente (Rykiel, 1996), pois tais problemas podem acarretar em interpolação inversa de distância e outros problemas com os preditores e resultados empíricos.

Para mais informações acerca do funcionamento, fundamentos teóricos e limitações dos sistemas recomenda-se a leitura de “Um Guia Prático para o Mapeamento Geoestatístico de Variáveis Ambientais” (HENGL, 2007), utilizado extensamente na realização do presente trabalho.

4.3. Metodologia

4.3.1. O Rio São Francisco

A rede de drenagem do rio São Francisco estende-se por uma área aproximada de 639.219 km², percorrendo regiões com variadas condições socioambientais e tendo usos diversos tais como a geração de energia, consumo, lazer, turismo, agricultura, indústria e piscicultura, sofrendo alterações relativas ao volume e à qualidade de suas águas em sua extensão. A bacia apresenta quatro subdivisões: Alto, Médio, Sub-médio e Baixo que sofrem de profundos contrastes socioeconômicos e grande vulnerabilidade ambiental (CBHSF, 2016), Figura 4.1.

O rio encontra dificuldades para atender às múltiplas demandas, vivenciando um período de crise hídrica que tem sido atribuído à diminuição das chuvas. A crise atual apresenta a maior duração e intensidade desde o advento das grandes barragens. Reconhece-se como seu início a data 01.04.13, quando se autorizou a redução (pioneira) das defluências do sistema hidroelétrico de 1300 m³.s⁻¹ para 1.100 m³.s⁻¹. Outras autorizações se seguiram e a partir de 02.10.17 uma vazão regularizada de apenas 550m³.s⁻¹ tem sido mantida no rio outrora intitulado "rio da integração nacional" (ANA, 2018).

É importante destacar que a área objeto de estudo se apresenta como o mais emblemático problema de gestão de recursos hídricos do país, onde a escassez da água se dá justamente nas regiões mais secas do Brasil, onde grandes empreendimentos como a transposição das águas do rio para outros Estados, visando abastecimento humano, além de grandes empreendimentos de irrigação e da presença de barragens para fins de regularização e produção de energia elétrica, têm concorrido juntamente com as mudanças climáticas para o agravamento da situação. Deste

modo, a modelagem espacializada dos atributos dos solos poderá contribuir de forma determinante para modelagem hidrológica da bacia e uma melhor compreensão dos seus aspectos hídricos mais relevantes.

Figura 4.1. Localização da bacia hidrográfica do rio São Francisco.



Fonte: (ANA/GEF/PNUMA/OEA, 2004) - Modificado

4.3.2. Modelagem Digital do Solo

A modelagem digital da condutividade hidráulica do solo saturado, foi realizada a partir de 9 (nove) camadas de dados, uma que contemplou o zoneamento das classes dos solos e 8 (oito) que contemplaram os atributos físicos, que foram utilizadas como preditores, todas no formato *raster* disponíveis a partir do ISRIC (ISRIC, 2018). Destaca-se que para isso foram avaliados 25 (vinte e cinco) preditores, obtidos ou confeccionados durante este estudo, e destes, foi feita a escolha das 9 (nove) camadas de maior interesse, que foram: Teores de Areia, Silte e Argila, Profundidade do Solo, Bulk Density (densidade aparente), Classificação Textural, Sol_AWC, WWC e Classes de solos pelo sistema norte americano.

Quanto aos atributos experimentais dos solos, no formato tabular, foram obtidos a partir do FeBR (ROSA et al, 2018) e do SISSOLOS (EMBRAPA, 2015). Os atributos de solos foram tratados quanto à existência de duplicidades, divergências e localização dos perfis amostrados. Estes dados empíricos foram necessários tanto na etapa do cálculo dos valores de condutividade hidráulica quanto na de ajuste dos semivariogramas.

As camadas *raster* foram trabalhadas de modo a darem origem a arquivos com a mesma resolução de pixel (1000 m), sistema de projeção, datum, número de linhas e colunas, em um formato final *GeoTiff*, que é um formato de arquivo que pode ser importado facilmente pelo *software* ILWIS, onde se processou o cálculo dos coeficientes de componentes principais para as 9 camadas preditoras. Tal prática gera novas grades rasters que conterão em seus *pixels* valores adimensionais relativos às composições entre as camadas consideradas para cada uma das componentes geradas.

De posse das componentes principais, utilizou-se o *software* R para a seleção das componentes estatisticamente relevantes, o computo do semivariograma e dos coeficientes de regressão. Com a obtenção dos coeficientes de regressão, da identificação das componentes de interesse e o ajuste do semivariograma, realizou-se a *Krigagem* do *raster* final com os valores da velocidade de infiltração básica espacializada para a região da bacia hidrográfica do rio São Francisco.

Na etapa realizada no R, foram necessários os dados tabulares georreferenciados dos solos, contudo não há no Brasil, disponibilidade de dados de condutividade hidráulica dos solos saturados. Deste modo, para a obtenção dos resultados, os dados da condutividade foram produzidos a partir de um método empírico, ainda em desenvolvimento, visto se contar com as

informações experimentais essenciais: teores de areia, de silte, de argila e de matéria orgânica. Com esta metodologia, foi gerado um *raster* de prova, que permitiu a avaliação final do *raster* produzido pela técnica de regressão por *krigagem*.

4.3.3. Fontes de dados

O presente trabalho fez uso das cinco principais fontes de dados existentes que oferecem dados tabulares sobre Brasil. O *International Soil Reference and Information Centre* (ISRIC), uma organização sem fins lucrativos financiada primariamente pelo governo holandês, oferece duas principais fontes para seus dados. A primeira é o SoilGrids, que disponibiliza uma série de previsões globais para propriedades numéricas padrão do solo, tais como carbono orgânico, densidade aparente, capacidade de troca catiônica (CEC), pH, frações de textura do solo e fragmentos grosseiros em sete profundidades padrão (0, 5, 15, 30, 60, 100 e 200 cm), além de previsões de profundidade para o leito de rocha e distribuição de classes de solo com base nos sistemas de classificação da *World Reference Base* (WRB) e USDA, com cerca de 280 camadas raster no total (Hengl et al, 2017). Já o *Soil and Terrain database for Latin America and the Caribbean* (SOTERLAC) dispõe de informações de 50 (cinquenta) perfis de solos, entre eles a condutividade hidráulica do solo saturado que varia de 0 a 7.4 mm.h⁻¹ o que será melhor discutido adiante.

Além destas, fora utilizada a base de dados da EMBRAPA, BdSolos/SisSolos. O Banco de dados de Solos (BdSolos) incorpora amostras e perfis de solos de todo o Brasil, contendo de forma ampla e aprofundada as características morfológicas, físicas, químicas e mineralógicas desses perfis com suas localizações geográficas, além de dados de fertilidade de solos. Já o Sistema de Informação de Solos (SisSolos) reúne em uma única plataforma todo o resultado de pesquisa produzido pela EMBRAPA entre as décadas de 70 e a contemporaneidade.

O Instituto Internacional de Análise de Sistemas Aplicados (IIASA) fornece seus dados a partir do *Harmonized World Soil Database* (HWSD), que é um banco de dados raster com mais de 15.000 diferentes unidades de mapeamento de solo que combina fontes como o SOTER, ESD, Mapa de Solos da China, WISE em um mapa atualizado que tem seus dados cruzados com as informações contidas nos levantamentos e mapas de solo feitas em escala 1.500.000 pela FAO-UNESCO no projeto Mapa Mundi do Solo (FAO, 1971-1981).

Essas fontes de dados disponibilizam informações como: carbono orgânico, pH, capacidade de armazenamento de água, profundidade do solo, capacidade de troca catiônica do solo e da

fração de argila, nutrientes trocáveis totais, condutividade elétrica, salinidade, classe textural e granulometria.

4.3.4. Hardware/Softwares utilizados

Foram utilizadas CPU XEON da INTEL com 8Gb em dual channel/paridade DDR3. Softwares ArcGis 10.1, Service Pack 1 da ESRI; ArcSWAT 2012 versão 10_1.9; GLOBAL MAPPER da Blue Marble Geográfics; /RSTUDIO; QGIS; LAZARUS; EXCEL/WORD e Windows 2012 server R2 da Microsoft; CALC do OfficeBr e Mozilla Firefox.

4.4. Resultados e Discussão

Em relação ao levantamento e obtenção de dados tabulares dos solos é necessário esclarecer que as diversas fontes têm seus dados primários a partir dos mesmos levantamentos. Na presente pesquisa foi feito um esforço de se reunir os dados de 582 (quinhentos e oitenta e dois) perfis para a bacia do São Francisco, ou seja, 1 perfil para cada 110.000 hectares.

Destarte a EMBRAPA contar com uma maior extensão de dados de origem própria, aos quais se tem acesso livre via BdSolos/SisSolos, grande parte não conta com coordenadas de geolocalização, o que dificulta o aproveitamento das informações.

Devido à falta de coordenadas, como no caso de Sergipe, onde de 230 perfis, apenas 114 possuíam coordenadas: Minas Gerais, de 781 perfis, 570 as possuíam; Bahia, de 655 perfis, somente 110; Pernambuco, de 180 perfis, 28 e Alagoas que dos 431 registros, nenhum as possuíam.

Ou seja, de aproximadas 1946 trincheiras de amostragem de solos existentes nos Estados, somente 273 puderam ser identificadas como incidindo na bacia hidrográfica do rio São Francisco. Complementou-se estes dados com os da base SOTERLAC, que dispõe de dados sobre 50 (cinquenta) perfis na bacia.

Quanto aos dados do Harmonized World Soil, são de difícil aproveitamento devido à falta, na forma tabular, de coordenadas de localização georreferenciada, Figura 4.2. Em relação aos dados SOTERLAC, observou-se que fora a única fonte que contava com o atributo condutividade hidráulica do solo saturado, contudo tais dados apresentavam uma incoerência marcante, que era o fato de serem inversamente proporcionais ao teor de areia e por isso não foram utilizados.

Em relação aos dados obtidos no FeBR, foram bastante aproveitáveis, visto que todos contam com campos de coordenadas, até onde se pode observar, sem qualquer lapso de dados. Nesta fonte pode-se resgatar as informações de solos de 259 (duzentos e cinquenta e nove) novos perfis.

Muito mais perfis estavam disponíveis, porém a principal limitação encontrada para a utilização de todos foi quanto a distribuição espacial, visto que, os levantamentos pedológicos no Brasil foram assumidos por trabalhos em escala local, a partir de pequenos projetos voltados por Estado ou Município ou mesmo pesquisas acadêmicas.

Tal estrutura, acarretou que os dados apresentaram densidade amostral maior de uma região para outra aleatoriamente. Para extensas áreas pode não haver nenhuma informação, enquanto que para áreas de poucos Km², pode-se encontrar mais de uma dezena de perfis, Figura 4.2. Esta situação traz consigo a difícil tarefa da seleção para descarte, mas este assunto não é tema do presente estudo que adotou o procedimento de excluir uma dentre duas trincheiras com distância menor que 10Km entre elas.

Em HENGL et al. (2007), encontramos que ao ter sido utilizado um conjunto de dados de 2251 perfis contra um de 222 perfis, para uma área de estudo de 100Km², o R² ajustado para os modelos de regressão não mudou muito, demonstrando que o investimento em preditores auxiliares realmente valeu o esforço - pois em ambos os casos a regressão por krigagem funcionou bem. Quando da comparação de erros nos pontos de validação, observou-se que a RK na resolução mais fina é sempre mais precisa que as mais grosseiras.

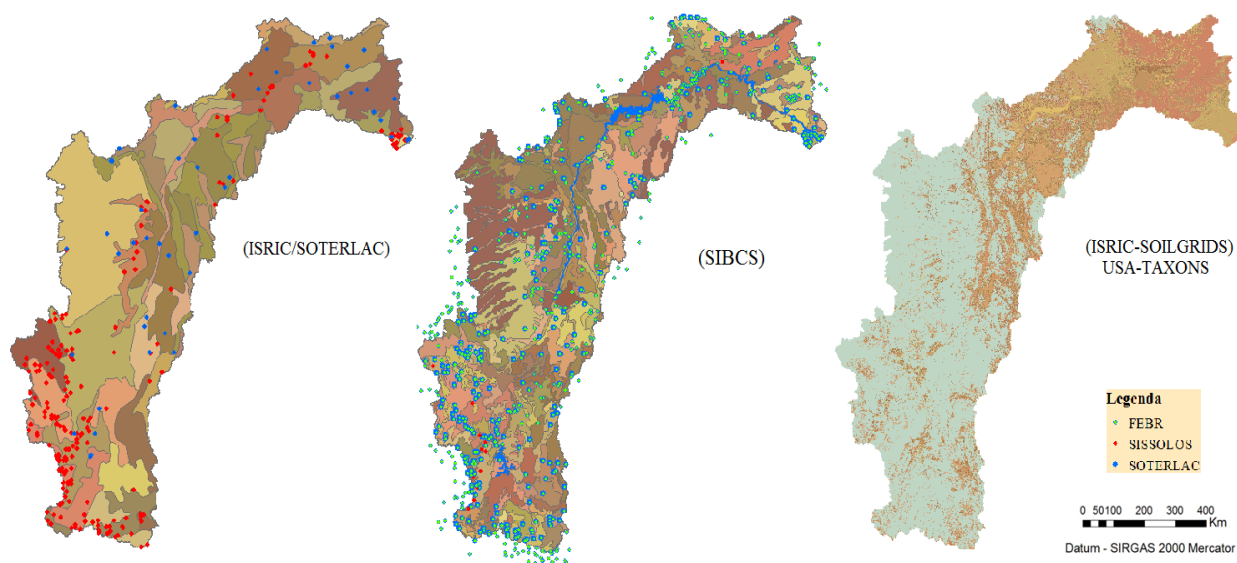
O teste t para os dois mapas não diferiram significativamente em sua precisão para teor de areia ($p = 0,641$) e de silte ($p = 0,608$). No entanto, os mapas de 25 m podem ser usados para mapear argila com uma precisão significativamente maior ($p = 0,044$). Isso indica para os futuros projetos de mapeamento que precisarão se concentrar mais na qualidade da amostragem e sua distribuição espacial e, com a mesma relevância, na qualidade de preditores ambientais auxiliares, ao invés de fazer observações numerosas e desordenadas.

Já para os dados vetoriais das classes de solos existentes na bacia hidrográfica do rio São Francisco, vê-se a partir da Figura 4.2 que as diferentes técnicas de reconhecimento dão origem a delimitações muito distintas, sendo que a técnica utilizada na confecção SOTERLAC (van ENGELN, 2005) gerou uma delimitação que guarda alguma relação com a carta SIBCS

(EMBRAPA, 2011), enquanto que para a técnica da regressão por krigagem dos taxons dos solos da bacia, realizada por HENGL et al. (ISRIC, 2017), muito raras correlações serão percebidas.

Em relação aos *rasters* utilizados como preditores, o volume de informações contido nos mesmos, Figura 4.3, seria de muito complexa análise por métodos diferentes do das Componentes Principais (PCA), que é realizado de forma automática sem necessidade de intervenção ou parametrização, sendo o único pré-requisito que os *rasters* apresentem mesmas características quanto às dimensões e sistema de projeção. Os resultados das principais componentes é dependente dos tipos e da qualidade dos preditores e os melhores resultados serão apresentados adiante.

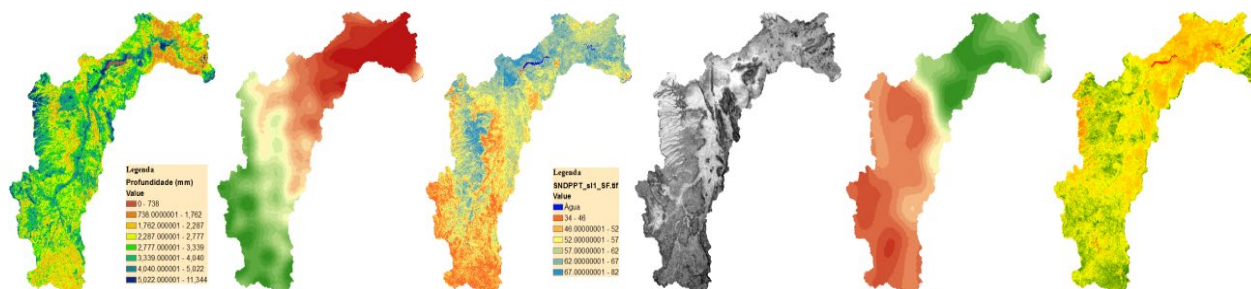
Figura 4.2. Mapeamentos resultantes das diferentes metodologias de zoneamento dos solos.



A PCA transformou um conjunto original de variáveis inter-correlacionadas em um número igual de novas variáveis independentes não correlacionadas ou componentes principais (PCs), mas ainda é preciso considerar um outro problema que pode influenciar a análise posterior - o efeito de multicolinearidade ou a sobreposição de informações nos preditores.

Tipicamente, a suposição de regressão linear múltipla é que os preditores são variáveis independentes (Neter et al., 1996). Na Tabela 4.1, vê-se os coeficientes encontrados através do ILWIS, estão destacados os valores mais elevados participantes nas componentes 1, 2, 5 e 6, que foram rankeadas para a regressão por krigagem.

Figura 4.3. Exemplos de algumas das camadas preditoras avaliadas no presente estudo, da esquerda para direita tem-se: Profundidade dos solos, Distribuição anual das chuvas, Teor de areia na primeira camada do solo (0-5cm), TWI SAGA, Distribuição dos Ventos e NDVI.



Com os 9 SPCs importados no R, na análise de regressão, obteve-se um r^2 de 0.4159 para a explicação da variabilidade. Pelos valores-t específicos dos coeficientes, pode-se identificar os preditores mais relevantes e neste caso, as componentes CP1, CP2, CP5 e CP6 foram estatisticamente significantes a $< 0,001$ do nível de probabilidade, sendo estes então os preditores com maior representatividade na explicação da variável-alvo, sendo que os preditores CP1 e CP2 são equivalentes na identificação dos atributos Densidade e Profundidade dos solos como muito relacionados. Nas CP5 e CP6 entram, em comum, o AWCtS, o CLYPPT, o SLTPPT, SNDPPT e a WWP, sendo que na CP6 há ainda uma participação relevante de TEXMHT. Isto permite concluir que a Textura e as capacidades de água no solo são também muito relacionadas.

Tabela 4.1. Coeficientes das Componentes Principais calculados pelo *software* ILWIS

Comp	1	2	3	4	5	6	7	8	9
CP1	0.010	0.329	0.006	0.004	0.013	0.001	0.004	0.944	0.011
CP2	-0.027	-0.942	-0.015	-0.012	-0.039	-0.005	-0.011	0.329	-0.041
CP3	-0.059	-0.040	-0.151	0.019	0.067	0.025	-0.050	0.003	0.982
CP4	-0.320	0.011	-0.653	-0.186	0.526	0.108	-0.343	0.000	-0.172
CP5	0.544	-0.048	0.298	-0.343	0.686	0.034	0.151	-0.000	0.043
CP6	0.450	-0.024	-0.358	0.774	0.148	0.157	0.142	0.000	-0.051
CP7	-0.056	0.000	0.119	-0.095	-0.109	0.981	0.020	0.000	0.001
CP8	0.258	-0.002	0.272	0.151	-0.046	0.009	-0.914	0.000	0.011
CP9	-0.570	-0.017	0.495	0.465	0.460	0.003	0.040	0.000	0.003

Nota: 1- Conteúdo de água no solo no solo saturado (AWCtS), 2-Densidade da terra fina do Solo (BLDFIE), 3-Teor de Argila (CLYPPT), 4-Silte (SLTPPT), 5-Areia (SNDPPT), 6-Classificação textural (TEXMHT), 7-Água disponível no solo (WWP), 8-Profundidade da superfície do solo até a rocha (BDTICM). 9-Classificação dos solos pelo sistema norte americano (TAXOUSA).

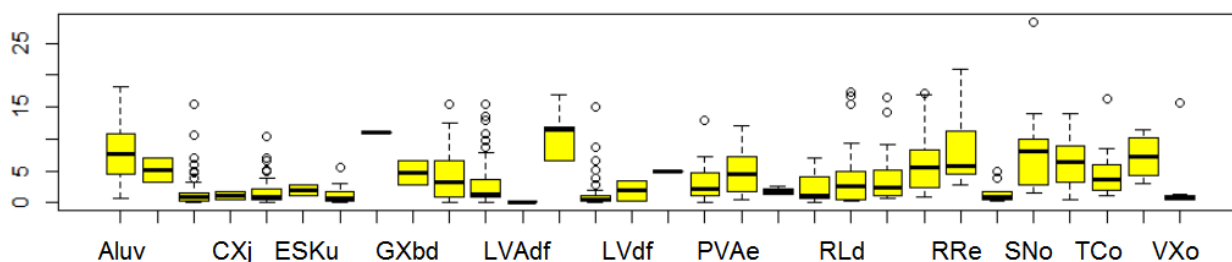
Obs.: As informações foram referentes à 1ª camada do solo, 0 a 5cm disponíveis no portal web do ISRIC(2018)/SOILGRIDS

No presente estudo, a Condutividade Hidráulica do solo saturado (K_s) não fora obtida experimentalmente, ao que se pode resgatar em Wang et al. (2013) : "O uso de funções de pedotransferência (PTF_ K_s), que foram derivadas em vários países para estimar indiretamente K_s , foi proposto (Buczko e Gerke, 2005; Julià et al., 2004).

No entanto, na prática, este método não deu resultados precisos quando os PTFs foram usados fora da região para a qual eles foram projetados (Li et al., 2007; Wang et al., 2012a). Deste modo, optou-se pelo desenvolvimento de uma metodologia empírica própria (KsT), que poderá ser calibrada quando da disponibilidade de dados experimentais.

Assim, os resultados servem apenas para o reconhecimento da bacia e para parametrização experimental de modelos hidrológicos espacialmente distribuídos. Na figura 4.4, pode ser visto um gráfico do tipo boxplot apresentando a distribuição dos dados KsT, além da inclinação em direção a valores mais baixos e presença de outliers.

Figura 4.4. Boxplot da distribuição do KsT para os diferentes tipos de solos.



Realizando-se uma análise visual do produto final obtido do KsT para a bacia do rio São Francisco, observou-se concordância entre os valores oferecidos aos modelos, os de ISRIC/SOILGRIDS, a partir das coordenadas dos perfis dos solos e seus KsT específicos, Figura 4.5. Os valores estimados pela regressão por krigagem foram muito correlacionados aos valores gerados pela metodologia empírica em estudo, demonstrando o motivo de sua grande aceitação no mundo científico, Figura 4.6.

Na parte superior da Figura 4.5, vê-se a grande similaridade da distribuição da intensidade do atributo estudado na região da bacia hidrográfica do rio São Francisco, entre os dois métodos, à esquerda, o método empírico em desenvolvimento e à direita, a sua predição pela técnica da regressão por krigagem. Na parte inferior, também no lado direito da figura 4.5, vê-se o resultado da variância que o R estima quando da realização da RK, o que é uma vantagem do método.

Finalmente, na parte inferior da figura 4.5, no lado esquerdo, uma composição colorida, onde as bandas foram compostas a partir das variações de intensidade dos atributos teor de argila (para o vermelho), teor de silte (como verde) e teor de areia (azul); ao se fazer uma rápida análise desta imagem, poder-se-á perceber que nas áreas de menor condutividade hidráulica do solo saturado, isto ocorrerá por dois motivos principais: ou pelo elevado teor de argila ou pelo elevado teor de silte.

Figura 4.5. Distribuição Espacial dos Ks modelados e composição RGB com as camadas texturais (Argila, Silte e Areia)

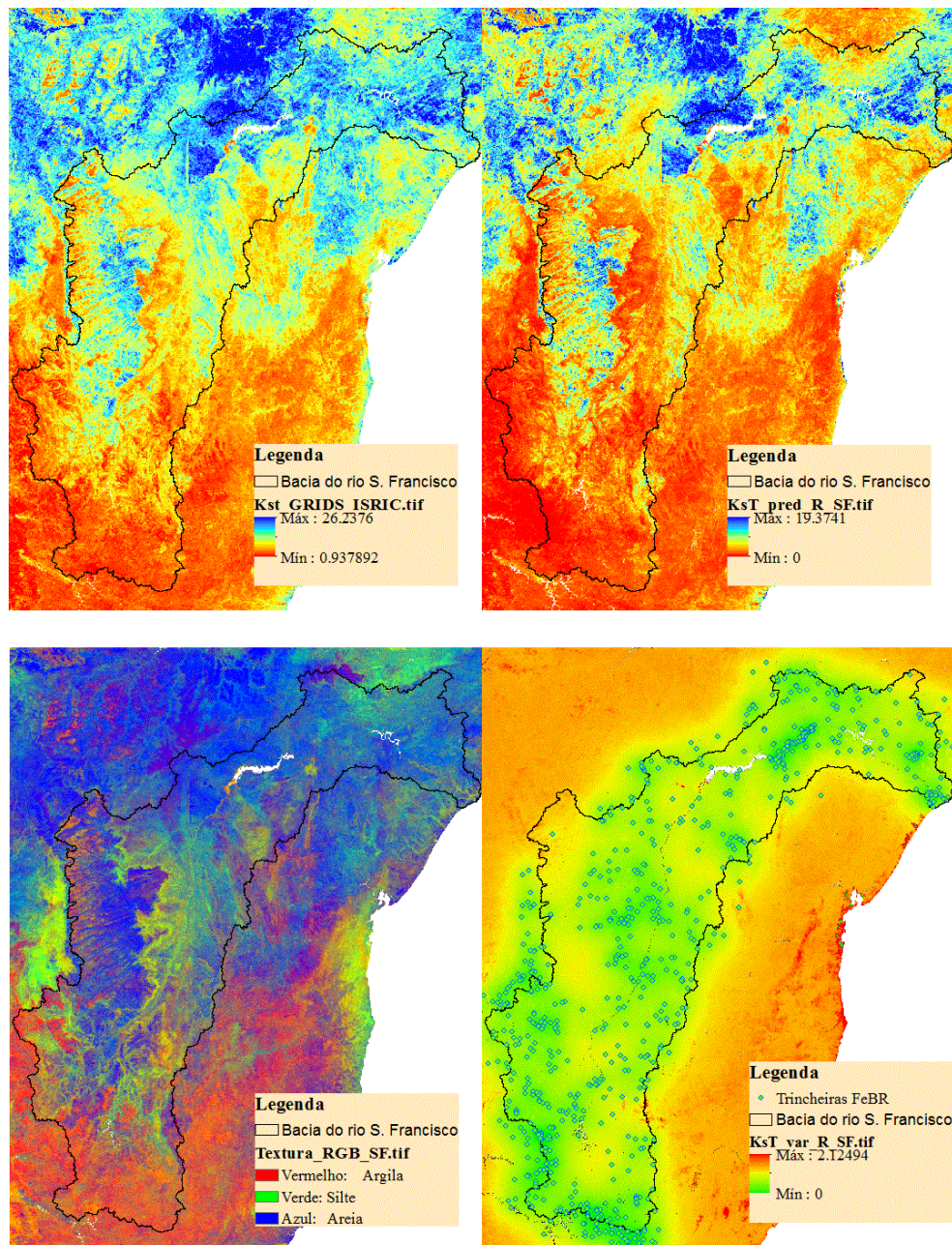
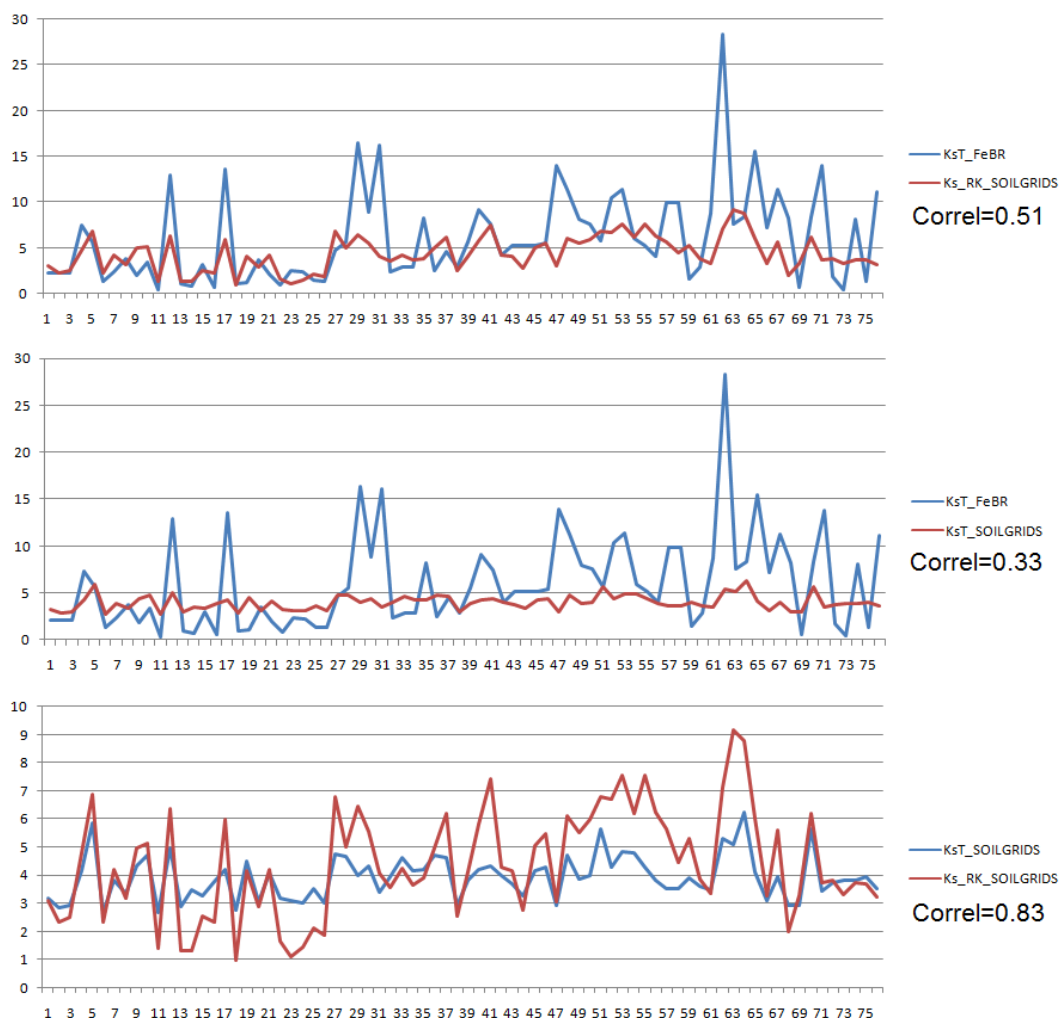


Figura 4.6. Ajuste gráfico dos valores Ks modelados e KsT_FeBR.



Na Figura 4.6, pode se ter uma ideia melhorada do ajuste entre os valores de K simulados no exercício de regressão por krigagem e os valores originais de entrada (KsT sobre a textura FeBR), como também com o KsT computado a partir das camadas ISRIC/SOILGRIDS, nas coordenadas de localização co-incidentes. Vê-se nitidamente que o modelo RK, conseguiu capturar o comportamento geral da variável de forma muito boa, com uma correlação de 0.83.

HENGL (2007) apresenta em sua discussão a seguinte afirmação: "os modelos são um pouco tendenciosos na predição de valores inferiores e superiores... O que surpreende mais é que a variação de predição não parece estar correlacionada com os erros verdadeiros".

Outro destaque a ser feito é que a grande maioria dos estudos sempre tendiam a se concentrar na variação do Ks das camadas superficiais do solo quando a escala de pesquisa era relativamente grande. No entanto, devido a processos ativos de formação do solo (por exemplo, a eluviação e a iluviação entre os horizontes do solo) e o impacto das atividades humanas em sua

estrutura (por exemplo, irrigação, plantio direto e compactação), os valores do Ks podem variar significativamente com a profundidade do solo. Os fatores que afetam Ks também podem diferir espacialmente em diferentes profundidades do solo e consequentemente a distribuição espacial do próprio Ks também pode diferir com a profundidade (Santra et al., 2008).

No presente estudo, buscou-se uma representação apenas da camada superficial dos solos com informações até 5 cm. Os resultados foram considerados muito satisfatórios, e permitem que sejam realizados os mesmos procedimentos para todas as demais camadas do solo. Porém, para isto, falta a realização de amostragem nas trincheiras estratégicas, de material indeformado em de todas as camadas, para a realização da estimativa de Ks experimentalmente.

4.5. Considerações Finais

A técnica da regressão por krigagem é muito robusta quando são oferecidas camadas preditoras coerentes, mesmo trabalhando com dados amostrais com representação espacial limitada (582 trincheiras) para uma área de 639.219 Km² da bacia hidrográfica do rio São Francisco, ajusta com muito boa precisão os resultados preditivos.

As camadas preditoras relativas à densidade, profundidade, textura e as capacidades de água no solo são muito relacionadas quando da obtenção de predições via regressão por krigagem da condutividade hidráulica dos solos saturados a uma profundidade de 0 a 5cm.

A modelagem de atributos dos solos pela técnica da RK permite um nível de detalhamento da variação espacial dos seus atributos de grande interesse para o conhecimento e mapeamento dos solos de uma região, possibilitando o estudo de grandes áreas a baixíssimo custo e curto espaço de tempo.

O estudo da estimativa, via regressão por krigagem, da condutividade hidráulica dos solos saturados na bacia hidrográfica do rio São Francisco revela a necessidade de se complementar o levantamento dos atributos físicos do solo, de modo planejado, em toda a região.

Essa abordagem ajudará a aperfeiçoar a obtenção de parâmetros hidrológicos distribuídos, imprescindíveis à tomada de decisão nas principais questões que o Brasil terá que enfrentar para o seu desenvolvimento: produção de alimentos, gestão dos recursos hídricos e proteção ambiental.

4.6. Referências

- ANA - Agência Nacional de Águas. **Página de acesso a dados** das estações pluviométricas da bacia hidrográfica do rio São Francisco. Disponível em: <http://hidroweb.ana.gov.br/>. Acesso em 05/03/2018.
- ANA, Subprojeto 1.1. B - **Determinação da carga de nutrientes do rio São Francisco na região de sua foz**. ANA/GEF/PNUMA/OEA, Maceió, AL. 2004.
- ATKINSON, P., QUATTROCHI, D. A., 2000. Special issue on geostatistics and geospatial techniques in remote sensing. **Computers & Geosciences** **26** (4): 359.
- BERVEGLIERI, A.; JUNIOR, M.M.; PITERI, M.A. Aplicação do interpolador krigagem em modelos digitais de terrenos, comparando-se os casos de isotropia e anisotropia. **Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE p.7222.
- BREVIK, E.C., CERDA, A., MATAIX-SOLERA, J., PEREG, L., QUINTON, J.N., SIX, J., VAN OOST, K., 2015a. The interdisciplinary nature of SOIL. **SOIL** **1**, 117–129. <http://dx.doi.org/10.5194/soil1-117-2015>.
- BREVIK, E.C., CERDA, A., MATAIX-SOLERA, J., PEREG, L., QUINTON, J.N., SIX, J., VAN OOST, K., 2015a. The interdisciplinary nature of SOIL. **SOIL** **1**, 117–129. <http://dx.doi.org/10.5194/soil1-117-2015>.
- BREVIK, E.C., HARTEMINK, A.E., 2010. Early soil knowledge and the birth and development of soil science. **Catena** **83**, 23–33.
- Buczko, U., Gerke, H.H., 2005. Estimating spatial distributions of hydraulic parameters for a two-scale structured heterogeneous lignitic mine soil. **J. Hydrol.** **312**, 109–124.
- BURROUGH, P. A.; McDONNELL, R. **Principles of geographical information systems**. New York: Oxford University Press, 1998. p.333.
- CALZOLARI, C.; FILIPPI, N., 2015. Evolution of key concepts in modern pedology with reference to Italian soil survey history. **Geoderma** **264** (2016) 275–283.
- CARROLL, M.L.; C.M. DIMICELI; R.A. SOHLBERG; TOWNSHEND, J.R.G. **250m MODIS Normalized Difference Vegetation Index**, Collection 4, University of Maryland, College Park, Maryland, Day 289, 2003.

CATEN, A.; Dalmolin, R.; Mendonça, M.S.; Giasson, E. Digital soil mapping: Characteristics of the brazilian approach. **Ciência Rural**, v.42, 2012. pp.1989-1997.

CBHSF, Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. **RF3-Resumo executivo do Plano de Recursos Hídricos da bacia hidrográfica do rio São Francisco 2016-2025**. Alagoas, 2016. 300p.

CHAGAS, C.S., PINHEIRO, H.S.K., JUNIOR, W.C., ANJOS, L.H.C., PEREIRA, N.R., BHERING, S.B. , Data mining methods applied to map soil units on tropical hillslopes in Rio de Janeiro, Brazil. **Geodrs** (2017), doi: 10.1016/j.geodrs.2017.03.004

CONSTANZA, R., 1994. Economia ecológica: uma agenda de pesquisa. In: MAY, P. H.; MOTTA, R. S. da (orgs.). Valorando a natureza: análise econômica para o desenvolvimento sustentável. p. 111-144. Rio de Janeiro: Campus.

DIAS, Laura Milani da Silva et al . Predição de classes de solo por mineração de dados em área da bacia sedimentar do São Francisco. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v. 51, n. 9, p. 1396-1404, Sept. 2016 .

EMBRAPA - Solos. Disponível em: <<http://www.solos.cnptia.embrapa.br>> Acesso em: 26/10/2015

EMBRAPA, 2001. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). Mapa de Solos (1:5,000,000). Rio de Janeiro, mapa.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. Disponível em: <<http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/en/>>. Acesso em: 20/03/2018.

FORKUOR, G.; Hounkpatin O.K.L; Welp G.; Thiel M (2017) High Resolution Mapping of Soil Properties Using Remote Sensing Variables in South-Western Burkina Faso: A Comparison of Machine Learning and Multiple Linear Regression Models. **PLoS ONE 12(1)**: e0170478. doi:10.1371/ journal.pone.0170478

FRAISSE, C., Sudduth, K., Kitchen, N., 2001. Delineation of site-specific management zones by unsupervised classification of topographic attributes and soil electrical conductivity. **Trans. ASAE** 44 (1), 155–166.

FRANCO, M.C.; CÓRDOBA, M.A.; BALZARINI, M.G.; COSTA, J.L. A pedometric technique to delimitate soil-specific zones at field scale. **Geoderma** **322** (2018) 101–111.

FRIEDL, M.A., D. SULLA-MENASHE, B. TAN, A. SCHNEIDER, N. RAMANKUTTY, A. SIBLEY and X. HUANG (2010), MODIS Collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets, 2001-2012, Collection 5.1 IGBP Land Cover, Boston University, Boston, MA, USA.

HENGL T, MENDES DE JESUS, J., HEUVELINK, G.B.M., RUIPEREZ, G.M., KILIBARDA, M., BLAGOTIC, A. et al. (2017) SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning. **PLoS ONE** 12(2): e0169748. <http://sci-hub.tw/https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169748>

HENGL T, MENDES, J.J.; HEUVELINK, G.B.M.; RUIPEREZ, G.M.; KILIBARDA, M.; BLAGOTIC, A. SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning. **PLoS ONE** 12(2): e0169748, 2017.

HENGL, T. A Practical Guide to Geostatistical Mapping of Environmental Variables. Luxembourg: **Office for Official Publications of the European Communities**. 2007, 143 pp.

HENGL, T., Heuvelink, G. M. B., Stein, A., 2004a. A generic framework for spatial prediction of soil variables based on regression-kriging. **Geoderma** **122** (1-2): 75–93.

HEUVELINK, G. B. M., Webster, R., 2001. Modelling soil variation: past, present, and future. **Geoderma** **100** (3-4): 269–301.

INDORANTE, S.J., McLeese, R.L., Hammer, R.D., Thompson, B.W., Alexander, D.L., 1996. Positioning soil survey for the 21st century. **J. Soil Water Conserv.** 51 (1), 21–28.

ISRIC - International Soil Reference and Information Center. **Acesso a Dados**. Disponível em: <http://geonode.isric.org/layers/geonode:soter_lac_map_unit>. Acesso em: 15/03/2017).

ISRIC - International Soil Reference and Information Center. **Acesso a Dados**. Disponível em: <<ftp://ftp.soilgrids.org/data/aggregated/1km/>>. Acesso em: mar.2018).

JARVIS A., H.I. REUTER, A. NELSON, E. GUEVARA, 2008, Hole-filled seamless SRTM data V4, **International Centre for Tropical Agriculture (CIAT)**. Disponível em: <<http://srtm.csi.cgiar.org>>. Acesso em: fev 2018.

- JULIÁ, M.F., Monreal, T.E., Jimenez, A.S.D., Melendez, E.G., 2004. Constructing a saturated hydraulic conductivity map of Spain using pedotransfer functions and spatial prediction. **Geoderma** **123**, 257–277.
- KRIGE, D. G., 1951. A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. **Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society** **52**: 119–139.
- KYRIAKIDIS, P.C., Shortridge, A.M., Goodchild, M.F., 1999. Geostatistics for conflation and accuracy assessment of digital elevation models. **International Journal of Geographical Information Science** **13** (7), 677–708.
- LAGACHERIE, P. Digital Soil Mapping: a state of the art. In: HARTEMINK, A. E.; McBRATNEY, A. B.; MENDONÇA-SANTOS, M. L. (Ed.). Digital Soil Mapping with Limited Data. Wageningen: Springer, 2008. p. 3-14.
- LARK, R. M., Cullis, B., Welham, S. J., 2005. On Spatial Prediction of Soil Properties in the Presence of a Spatial Trend: The Empirical Best Linear Unbiased Predictor (E-BLUP) with REML. **European Journal of Soil Science** **57**: 787–799.
- LI, Y., CHEN, D., WHITE, R.E., ZHU, A., ZHANG, J., 2007. Estimating soil hydraulic properties of Fengqiu County soils in the North China Plain using pedo-transfer functions. **Geoderma** **138**, 261–271.
- LIMA, A.S., BILICH, L., REATTO-BRAGA, A., ROIG, H. (2013). Mapeamento de Solos do Tradicional ao Digital. 10.13140/RG.2.1.1662.1605.
- LIMA, A.S., Larissa & Bilich, Marina & Reatto-Braga, Adriana & Roig, Henrique. (2013). Mapeamento de Solos do Tradicional ao Digital. 10.13140/RG.2.1.1662.1605.
- LIU, N., LIU, Q., WANG, L., LIANG, S., WEN, J., QU, Y., & LIU, S. (2013). A statistics-based temporal filter algorithm to map spatiotemporally continuous shortwave albedo from MODIS data. **Hydrology and Earth System Sciences**, **17**, 2121-2129, doi:2110.5194/hess-2117-2121-2013
- LIU, Q., WANG, L., QU, Y., LIU, N., LIU, S., TANG, H., & LIANG, S. (2013). A Primary Evaluation of GLASS Albedo Product. **International Journal of Digital Earth**, doi:10.1080/17538947.17532013.17804601
- MARBUT, C.F., 1922. Soil classification. Am. **Soil Surv. Assoc. Bull.** **B3**, 24–33.

- MENDES, W.; CRUZ-LEMOS, P. de O; LEMOS, R.C.; CARVALHO, L.G.; ROSENBERG, R.J. 1954. Contribuição ao mapeamento em séries, dos solos do município de Itaguaí. Rio de Janeiro, CNEPA - Instituto de Ecologia e Experimentação Agrícola, 53p. (BRASIL. Ministério da Agricultura. CNEPA, IEA. Boletim, 12).
- MENDONÇA-SANTOS, M.L.; SANTOS, H.G. The state of the art of Brazilian soil mapping and prospects for Digital soil mapping. **Developments in Soil Science**, Vol. 31. Elsevier, 2007.
- MILLER, B.A., 2012. The need to continue improving soil survey maps. **Soil Horiz.** 53, 11–15. <http://dx.doi.org/10.2136/sh12-02-0005>.
- MILLER, B.A., SCHAETZL, R.J., 2014. The historical role of base maps in soil geography. **Geoderma** 230–231, 329–339. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.04.020>.
- NASA. Jet Propulsion Laboratory (JPL) - National Aeronautics and Space Administration (NASA). Disponível em: <<https://www.jpl.nasa.gov/news.php?release=2014-321>>. Acesso em: 26-03-2018. EMBRAPA - Sisolos. Disponível em: <<http://www.sisolos.cnptia.embrapa.br>> Acesso em: 22/03/2018.
- NETER, J., Kutner, M. H., Nachtsheim, C. J., Wasserman, W. (Eds.), 1996. Applied Linear Statistical Models, 4th Edition. McGraw-Hill, p. 1391.
- OMUTO, C., Nachtergaele, F., Vargas Rojas, R., 2013. State of the art report on global and regional soil information: where are we? Where to go? **Global Soil Partnership Technical Report**. FAO, Rome.
- Qu, Y., Liu, Q., Liang, S., Wang, L., Liu, N., & Liu, S. (2013). Improved direct-estimation algorithm for mapping daily land-surface broadband albedo from MODIS data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, doi:10.1109/TGRS.2013.2245670
- RYKIEL, E. J., 1996. Testing ecological models: the meaning of validation. **Ecological Modelling** 90: 229–244.
- SAMUEL-ROSA, A.; GUBIANO, P.I.; DOTTO, A.C.; RIBEIRO, E. et al. Bringing together Brazilian soil Scientists to Share Soil Data. XII **Reunião Sul Brasileira de Ciência do Solo**, abr. 2018.

SAMUEL-ROSA, A.; VASQUES, G. Dados para aplicações pedométricas em larga escala no Brasil. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (Boletim Informativo)**, Vol. 43, pp. 22-24, 2017.

SAMUEL-ROSA, A.; VASQUES, G. Dados para aplicações pedométricas em larga escala no Brasil. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (Boletim Informativo)**. Volume 43, Número 3, Set/Dez 2017.

SANCHEZ, P.A. et al. Digital soil map of the world. **Science**, v.325, p.680-681, 2009.
Disponível em: Acesso em: 12 out. 2011. doi: 10.1126/science.1175084.

SANTRA, P., Chopra, U.K., Chakraborty, D., 2008. Spatial variability of soil properties and its application in predicting surface map of hydraulic parameters in an agricultural farm. **Curr. Sci.** 95, 937–945.

SANTRA, P., Chopra, U.K., Chakraborty, D., 2008. Spatial variability of soil properties and its application in predicting surface map of hydraulic parameters in an agricultural farm. **Curr. Sci.** 95, 937–945.

SAXTON, K. E.; RAWLS, W. J. Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. Madison(USA): **Journal Soil Science Society of America**, Vol. 70:1569-1578, 2006.

VIEIRA, P. F., 1995. Meio Ambiente, Desenvolvimento e Planejamento. In: VIOLA, E. et al. **Meio Ambiente, Desenvolvimento e Cidadania: Desafios para as Ciências Sociais**. p.45-97. São Paulo: Cortez; Santa Catarina: Universidade Federal de Santa Catarina.

van ENGELN, V.W.P. et al. Harmonized Global Soil Resources Database. Final **Report**. 2005/06. Disponível em: <<http://www.isric.org/documents/document-type/isric-report-200506-harmonized-global-soil-resources-database-final-report>>. Acesso em: 01/06/2017.

VIEIRA, P. F., 1995. Meio Ambiente, Desenvolvimento e Planejamento. In: VIOLA, E. et al. **Meio Ambiente, Desenvolvimento e Cidadania: Desafios para as Ciências Sociais**. p.45-97. São Paulo: Cortez; Santa Catarina: Universidade Federal de Santa Catarina.

WALTER, C., McBratney, A. B., Donuaoui, A., Minasny, B., 2001. Spatial prediction of topsoil salinity in the Chelif valley, Algeria, using local ordinary kriging with local variograms versus whole-area variogram. **Australian Journal of Soil Research** 39: 259–272.

- WANG, Y.; SHAO, M.; LIU, Z.; HORTON, R. Regional-scale variation and distribution patterns of soil saturated hydraulic conductivities in surface and subsurface layers in the loessial soils of China. **Journal of Hydrology** 487 (2013) 13–23.
- WANG, Y.Q., Shao, M.A., Liu, Z.P. Pedotransfer functions for predicting soil hydraulic properties of the Chinese Loess Plateau. **Soil Sci.** 177 (7), 424–432, 2012a.
- WEBSTER, R.; OLIVER, M.A. Geostatistics for Environmental Scientists. Statistics in Practice. John Wiley & Sons, Chichester, 265 pp, 2001.
- WILDING, L.P. Factors of soil formation: contributions to pedology. Factors of Soil Formation: A Fiftieth Anniversary Retrospective. SSSA Special Publication 33. **Soil Science Society of America**, Madison, WI, pp. 15–30, 1994.

Capítulo 5 - PARADIGMA BIG DATA NA MODELAGEM HIDROSEDIMENTOLÓGICA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO

5.1. Introdução

O desenvolvimento de modelos matemáticos é parte integral da percepção objetiva acerca dos fenômenos que são estudados na Hidrologia. As dificuldades na obtenção e tratamento dos dados, que serão listadas ao longo desse artigo, fazem emergir um paralelo com o conceito de *Big Data*. Pode-se definir *Big Data* como um “conjunto de dados complexos de volume massivo que fluem das mídias sociais e dos monitoramentos em tempo real.” (ISHWARAPPA; ANURADHA, 2015).

Os dados necessários para a modelagem da bacia hidrográfica do rio São Francisco podem apresentar problemáticas e características semelhantes aos do *Big Data*, especialmente no que se refere à sua heterogeneidade, normalização e processamento requeridos nas diferentes etapas de tratamento dos mesmos. Esse é o motivo pelo qual, segundo Senthivaldius *et al.* (2016), acredita-se que metodologias analíticas possam ser feitas em grandes conjuntos de dados, tornando-os passíveis de serem aplicados, do mesmo modo como o que ocorre com os *Big Data*.

Guidolin *et al* (2016) complementam essa linha de raciocínio aplicando-a à modelagem hidrológica no contexto da predição de inundações, apontando que os problemas incluem a avaliação do risco de inundação para domínios de tamanho continental, simulações de inundações, análise de incerteza com um grande número de combinações de parâmetros de entrada e a análise de mudanças climáticas. Esses fatores demandam o uso de modelos velozes e capazes de executar simulações satisfatórias.

Ishwarappa e Anuradha (2015) definem as características do *Big Data* a partir do volume, da velocidade (que se refere tanto à criação quanto à interpretação dos dados) e da variedade, já que os dados de modelagem e do *Big Data* nem sempre são estruturados ou fáceis de se estabelecer relações. Um modelo deve levar em conta essa heterogeneidade e não-estruturação, como defendem Guo *et al* (2018).

Outro importante fator diz respeito à veracidade, afinal, dados gerados em alta velocidade não podem ser 100% precisos. Por vezes, isso gera a necessidade antes inexistente de aplicar (ou

criar) novas rotinas de tratamento para poder, então, fazer uso dessas informações. Por fim, todo esse tempo e recurso investido em análise deve gerar um retorno prático. A respeito disso, Jones *et al* (2016) afirmam que compreender as motivações e ações humanas relacionadas aos problemas ambientais é fundamental para a modelagem de sistemas complexos, humanos e naturais.

Tendo em vista as dificuldades e a importância crescente que a modelagem adquire na vertente social — onde é conhecimento-chave para traçar estratégias de gestão efetiva de recursos hídricos, diante das crescentes pressões de mudanças globais e dificuldades em gerenciar eficientemente uma água cada vez mais escassa e menos confiável (VAIRAVAMOORTHY *et al*, 2016), já que, conforme Liu *et al* (2015), as ações humanas acabam por mudar profundamente as condições físicas e as interações que esse corpo estabelece, justificando os esforços para gerar informações que auxiliem na resolução de problemas ambientais, como secas e inundações.

Para tanto, modernização é necessária. Os Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) surgiram no Canadá, na década de 1960. Eles evoluíram muito, permitindo a leitura/criação de arquivos georreferenciados e a realização de procedimentos sobre tais arquivos, como recortar áreas de interesse, calcular áreas/distâncias, dentre outros processos. Os SIGs são extensíveis, pois aceitam bibliotecas de ferramentas a partir da incorporação de extensões, o que amplia suas capacidades. A extensão ArcSWAT é uma interface gráfica do usuário desenvolvida para o SIG ArcGIS® da ESRI, que permite a parametrização e simulação de modelos SWAT (*Soil and Water Assessment Tools*) (ARNOLD *et al.*, 1998).

O SWAT é um modelo hidrológico desenvolvido para prever o impacto das práticas de manejo de terras na produção de água, sedimentos e poluentes em bacias hidrográficas grandes e complexas com diferentes solos, uso do solo e condições de manejo por longos períodos de tempo (ARNOLD *et al.*, 2012). O SWAT é um *Software* livre que tem tido muito sucesso, já com mais de 2.500 artigos publicados (TAMU, 2018).

Assim, o objetivo do presente artigo será levantar correlações entre o paradigma *Big Data* e as operações com ArcSWAT na criação da estrutura de dados de um modelo SWAT para a bacia do rio São Francisco. Para alcançar tal propósito, busca-se definir e descrever procedimentos realizados e ferramentas utilizadas para a obtenção, tratamento e aplicação de dados e, enquanto se desenvolve o trabalho, discute-se com as principais características *Big Data*. No processo de

delineamento dos comportamentos de produção de água e de sedimentos destacou-se a sensibilidade do SWAT, que evidenciou eventos sedimentológicos importantes.

5.2. Metodologia

5.2.1. O Rio da integração Nacional

A rede de drenagem do rio São Francisco estende-se por uma área aproximada de 639.219 Km², percorrendo regiões com variadas condições socioambientais e tendo usos diversos tais como a geração de energia, consumo, lazer, turismo, agricultura, indústria e piscicultura, sofrendo alterações relativas ao volume e à qualidade de suas águas em sua extensão. A bacia apresenta quatro subdivisões: Alto, Médio, Sub-médio e Baixo que sofrem de profundos contrastes socioeconômicos e grande vulnerabilidade ambiental (CBHSF, 2016).

O rio encontra dificuldades para atender às múltiplas demandas, vivenciando um período de crise hídrica que tem sido atribuído à diminuição das chuvas. A crise atual apresenta a maior duração e intensidade desde o advento das grandes barragens. Reconhece-se como seu início a data 01.04.13, quando se autorizou a redução (pioneira) das defluências do sistema hidrelétricas de 1300 m³.s⁻¹ para 1.100 m³.s⁻¹. Outras autorizações se seguiram e a partir de 02.10.17 uma vazão regularizada de apenas 550m³.s⁻¹ em sido mantida no rio outrora intitulado "rio da integração nacional" (ANA, 2018).

Creech *et al.* (2015), aborda o esforço para ajudar tomadores de decisão no planejamento do futuro da navegação fluvial no rio São Francisco, no qual se obteve sucesso no desenvolvimento de um modelo SWAT da bacia hidrográfica para compreender o acúmulo de sedimentos no canal de navegação e nos reservatórios. Esse acúmulo de sedimentos origina uma série de problemas, pois os mesmos são importantes para a reprodução dos peixes nas lagoas marginais que se enchiam naturalmente durante as cheias do rio (ARAÚJO et al., 2008).

Creech *et al* (2015) também denotou a diminuição do aporte de sedimento para a região do estuário do rio e para a zona costeira adjacente, causando graves desequilíbrios tanto para as cadeias tróficas estuarina e marítima, quanto para a economia agrícola e pesqueira além de consideráveis problemas socio-ambientais (MEDEIROS et al., 2007; TONIAL, 2011; ARAÚJO et al., 2016).

5.2.2. Criação da estrutura de dados do SWAT

É importante observar a distinção dos dados para parametrização da estrutura do modelo SWAT dos parâmetros do modelo SWAT. Os dados para a parametrização da estrutura do modelo tornam-se *defaults*, que ficam registrados nos bancos de dados dos projetos ArcSWAT. A partir daí, poderão ser gravados como estrutura do modelo SWAT em uma pasta (*TxtInOut*) que conterá arquivos em formato texto. Tais arquivos apresentam uma hierarquia que os vinculam às unidades espaciais que representam, como a bacia, sub-bacias e *Hydrologic Response Units* - HRUs (YEN *et al*, 2014).

Os momentos mais elementares para a criação desta estrutura de dados pelo ArcSWAT são: criação de um projeto; inclusão/edição de atributos no banco de dados de projeto ("opcional" para EUA); Delineamento da Bacia Hidrográfica; Definição de HRUs; Definições das variáveis climáticas de entrada (*idem*); Gravação na estrutura de dados do SWAT dos valores de atributos contidos no banco de dados do projeto; Definições de setup e execução do SWAT. As etapas que são opcionais para os EUA, disponíveis via ArcSWAT, são as fontes de dificuldades para outras regiões.

O SWAT encontra-se agora na *WEB*, a partir da ferramenta *Hydrologic and Water Quality System* (HAWQS), que foi desenvolvido para atender as necessidades da *Environmental Protection Agency of United States*(USEPA, 2016) e pode ser utilizado por outros interessados, como pesquisadores, governos federais e locais, a exemplo do Estado do Pernambuco no Brasil, que implementou o SUPer (TAMU, 2018). Isto poderá promover mudança na problemática exposta, ao viabilizar o surgimento de um repositório de dados com cobertura nacional, que poderão ser oferecidos devidamente estruturados para a modelagem hidrológica também em modo *off-line*.

5.2.3. Dados preliminares da Bacia Hidrográfica do rio São Francisco

Os principais dados tabulares requeridos são os atributos de Solos, os atributos de Cobertura/Uso das terras e as séries de dados das variáveis climáticas. Os dados de solos são obtidos a partir de três fontes, sendo estas a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2015), o *International Soil Reference and Information Center* (ISRIC, 2017), na seção do programa *Soil and Terrain Database for Latin America and the Caribbean* (SOTERLAC), e o *Harmonized World Soil Database* (HWSD), versão 1.2 (FAO, 2017).

Os demais atributos de solos foram estimados com a função de pedotransferência (SAXTON; RAWLS, 2006), com a equação do albedo (BAUMER, 1990) e com a equação de Auerswald (WISCHMEIER et al., 1971), o USLE K. Em relação aos atributos de Cobertura/Usos das terras, não foram encontradas fontes específicas. Contudo, a base de dados relativa aos EUA possibilita a adoção de Coberturas/Usos relacionáveis, bastando alguns ajustes em atributos como o índice de área foliar, principalmente: o número de horas-luz e Curva Número.

Os dados de precipitação (mm) foram obtidos no HIDROWEB para o período de janeiro de 1912 a fevereiro de 2017 (ANA, 2017) e de XAVIER (2015) para o período de janeiro de 1980 a dezembro de 2010. Já o repositório de dados sintéticos GlobalWeather (TAMU, 2017) oferece todos os arquivos no formato reconhecido pelo ArcSWAT e seus dados diários de temperaturas mínima e máxima do ar ($^{\circ}\text{C}$), umidade relativa do ar (%), velocidade do vento (m.s^{-1}) e radiação solar ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$); por não apresentarem lapsos nas séries e pela robustez dos modelos envolvidos nos seus cálculos, foram utilizados sem qualquer demanda extra.

Para a calibração, utilizou-se os dados de vazão registrados pela estação fluviométrica nº 49370000, localizada em Pão de Açúcar/AL, no período abrangido de 1955 a 1961. ANA (2017) e, em função do segundo período decorrer no pós grandes barragens, utilizou-se a série de vazões sintéticas (de 1980 a 2010) do Sistema de Acompanhamento de Reservatórios (ONS, 2016), para validação.

Quanto aos arquivos georreferenciados, obteve-se a carta de solos, em formato vetorial, a partir de MMA (2015); em relação à carta de uso/ocupação das terras, considerando que se objetivou montar um cenário representativo para a bacia hidrográfica do rio São Francisco de meados dos anos 1950, foram utilizadas imagens de cartas de vegetação e zoneamentos agroecológicos e agrícolas encontradas em Rumsey (2017), que foram georreferenciadas e re-projetadas para o sistema de coordenadas planas SIRGAS 2000 Mercator.

O MDT de *pixel* de 90m pode ser obtido a partir do portal do Centro Internacional para Agricultura Tropical (CIAT, 2017) e requer apenas mosaicagem e recorte com uso de uma camada vetorial abrangendo a área da bacia, acrescida de um *buffer* de 5km, gerando um único arquivo, com sistema de coordenadas planas SIRGAS 2000 Mercator, adequado para cálculos de distâncias e áreas. Já os de 30m, seus arquivos são obtidos a partir do repositório Earthexplorer do Departamento de Geologia dos Estados Unidos (USGS, 2017) e requerem procedimentos como: uso de função condicional para remoção valores negativos; reclassificação, para

substituição de *NoDatas* por zeros; interpolação (*fill*/ESRI) para correção dos *outliers*; mosaicagem, recorte e determinação do sistema de coordenadas.

5.2.4. Gravação da estrutura de dados/Calibração do SWAT

Com os dois MDTs processados, conduziu-se o delineamento do divisor de águas da bacia hidrográfica do rio São Francisco, onde foram avaliadas a qualidade das drenagens geradas e o tempo de processamento gasto, conforme o MDT utilizado, o que permitiu a escolha de um deles para uso definitivo e a conclusão desta e da próxima etapa: a Análise de HRUs. Esta, demanda os arquivos georreferenciados: cartas de solos; de uso/ocupação das terras e classes de declividade, aqui estabelecidas em conformidade com EMBRAPA (1979).

Na etapa de Definição das HRU's, foram determinadas faixas de cortes entre Coberturas/Usos das terras, tipos de solo e declividade, em 10% em relação à área da sub-bacia, 15% em relação à Cobertura/Uso e 10% em relação ao tipo de solo, respectivamente. Deste modo, o essencial requerido pelo ArcSWAT foi disponibilizado para a bacia do São Francisco e registrado no banco de dados de projeto do modelo.

Em relação à estrutura de dados do modelo SWAT, a única ação realizada foi a criação da pasta *TxtInOut* no momento da criação do Projeto. Para a gravação da estrutura são necessárias as séries, mensuradas ou sintéticas, das variáveis de entrada, o que é feito através da interface *Write SWAT Input Tables* do ArcSWAT e a finalização se dá com a gravação do arquivo *file.cio*, que é realizada a partir da opção *Setup SWAT Run* da interface *Setup and Run SWAT Model Simulation*.

Da calibração, Abbaspour (2013) afirma que sua meta é caracterizar um conjunto de parâmetros para que as saídas dos modelos se encaixem às variáveis utilizadas na função objetivo. Os parâmetros mais sensíveis foram obtidos por análise de sensibilidade com SWAT-CUP utilizando dados de chuva de 20 estações e da vazão em Pão de Açúcar/AL, do HIDROWEB da ANA (2017) e demais dados de entrada a partir das médias diárias GlobalWeather (TAMU, 2017), no período de 01/01/1955 a 31/12/1961.

5.2.5 Hardware/Softwares utilizados

Foram utilizadas CPU XEON da INTEL com 8Gb em dual channel/paridade DDR3. Softwares ArcGis 10.1, Service Pack 1 da ESRI; ArcSWAT 2012 versão 10_1.9; SWAT-CUP versão 5.1.6.2 da EAWAG; GLOBAL MAPPER da Blue Marble Geográfics; /RSTUDIO; QGIS;

LAZARUS; EXCEL/WORD e Windows 2012 server R2 da Microsoft; CALC do OfficeBr e Mozilla Firefox.

5.3. Resultados e Discussão

Para a escolha do MDT adequado à modelagem de uma grande bacia, foi necessária a informação vetorial da drenagem, gerada pelo próprio ArcSWAT na etapa de delineamento. A partir dela, avaliou-se que o MDT de *pixel* de 90m não implicava em grandes perdas, pois na maioria das vezes explicava melhor o trajeto do leito do rio, Figura 5.1. Outro ponto a favor do MDT de *pixel* de 90m foi o tempo de processamento na etapa de delineamento da bacia que foi da ordem de um décimo do tempo em relação a quando se utilizou o MDT de 30m.

Uma ocorrência: Na seção *calculation of subbasin parameters*, da etapa de delineamento, constam três opções que, nos experimentos com pequenas bacias, não geravam erros quer selecionadas ou não. Neste experimento, com uma grande bacia, todas as opções foram ativadas, caso contrário resultava em erro. Em relação à melhor qualidade da drenagem do MDT de 90m, visto na Figura 5.1.

Deve ser observado que os MDTs de 30m foram interpolados através de técnica (*fill*), sem uso das análises do variograma e do semi-variograma Carmo *et al.* (2015), suavizando excessivamente os relevos de baixas altitudes. Nas cenas de regiões de vales mais encaixados, o MDT de *pixel* de 30m explicava pouco melhor o trajeto do curso do rio, mas tais ganhos foram muito pequenos para justificar o grande aumento do tempo de processamento.

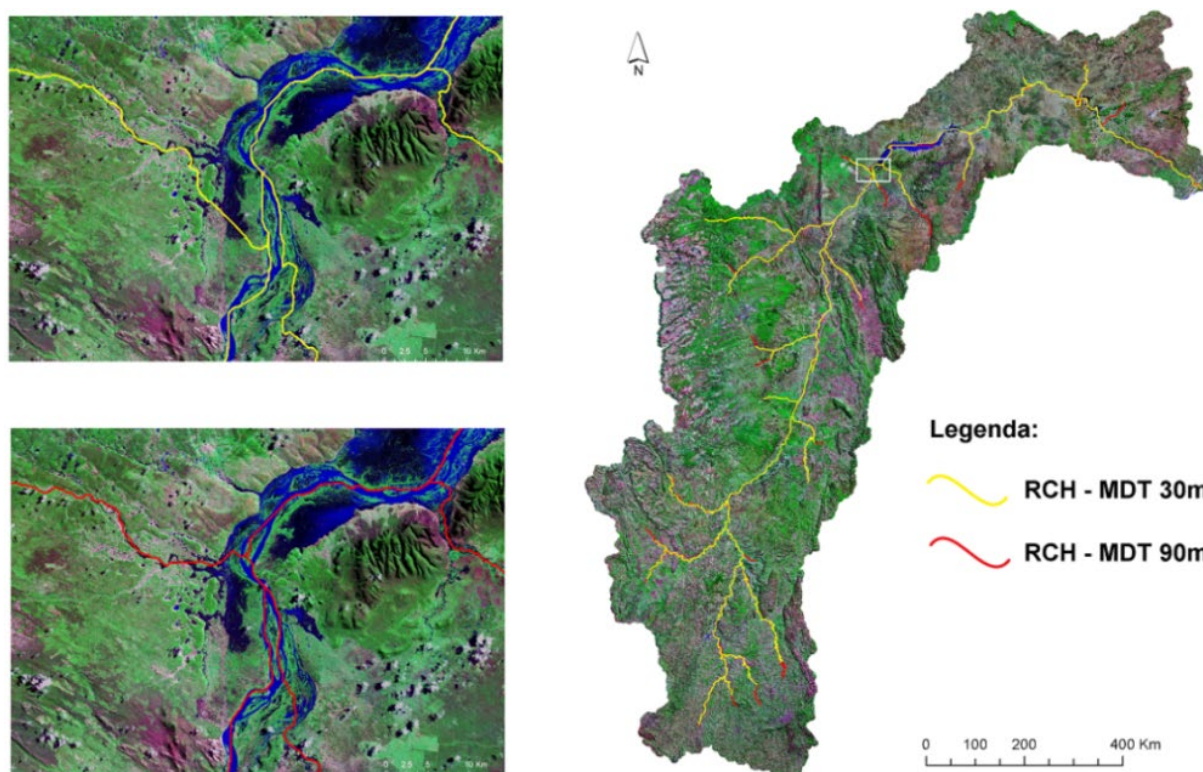
De acordo com Ishwarappa e Anuradha (2015), 90% dos *Big Data* são dados que, quanto à sua variedade, encontram-se de forma não estruturada. Este tipo de *Big Data* é muito comum nas pesquisas hidrológicas. No exemplo da Figura 5.1, utilizou-se uma camada adicional de informação, uma imagem de satélite tratada, onde se obtiveram cinco dimensões (duas de posição e três para cor do *pixel* realçado) que possibilita uma avaliação visual expedita.

Ao se trabalhar com os dados de Coberturas/Usos das terras, problemas deste tipo também foram encontrados, quando houve a necessidade de realizar buscas por imagens de cartas de época (Figura 5.2), textos descritivos históricos de temas como o crescimento econômico das localidades e imagens, tais como as cartas com zoneamentos e fotografias.

Automatizar procedimentos desta natureza é uma das possibilidades factíveis às tecnologias que tratam dos *Big Data*, que permitem extração de dados até mesmo das

informações contidas em vídeos. Guo *et al* (2018) criticam o arcabouço de dados de recursos hídricos: para o autor, este apresenta um estrangulamento, pois usa principalmente banco de dados relacionais para gerenciar dados estruturados e implementar dados espaciais, organizando dados semi-estruturados ou não estruturados em diretórios de armazenamento de arquivos.

FIGURA 5.1. Análise da qualidade das drenagens geradas via MDTs de 30m de 90m.



O autor apresenta uma abstração ao problema ao sugerir uma arquitetura *Big Data* que encapsula em 4 (quatro) camadas: coleta de dados (acervos/tempo real); armazenamento de dados; processamento/análise de dados (capacidade de aprendizado) e na última camada as aplicações, a exemplo do SWAT, de forma transparente.

Quanto aos dados tabulares, os de solos (EMBRAPA, 2015) demandaram técnicas de *Data Mining*. Na presente pesquisa foi feito um esforço de se reunir os dados de 323 (trezentos e vinte e três) perfis para a bacia do São Francisco, ou seja, 1 perfil para cada 218.419 hectares. Devido à falta de coordenadas, como no caso de Sergipe, onde de 230 perfis, 114 possuíam coordenadas; Minas Gerais, de 781 perfis, 570 as possuíam; Bahia, de 655 perfis, apenas 110; Pernambuco, de 180 perfis, 28 e Alagoas que dos 431 registros, nenhum possuía.

Ou seja, de aproximados 1946 perfis de solos existentes nos Estados, 116 incidiram na bacia. Considerando-se as diferenças de parametrização destes solos com os da base

SOTERLAC, que dispunha de dados sobre 185 (cento e oitenta cinco) perfis no Velho Chico, o atributo condutividade hidráulica variou de 0 a 653 mm.h⁻¹, a partir da função de pedotransferência, enquanto na segunda fonte apresentava variações entre 0 a 7.4 mm.h⁻¹. Na Figura 5.3 são apresentadas as distribuições dos locais de amostragem dos solos.

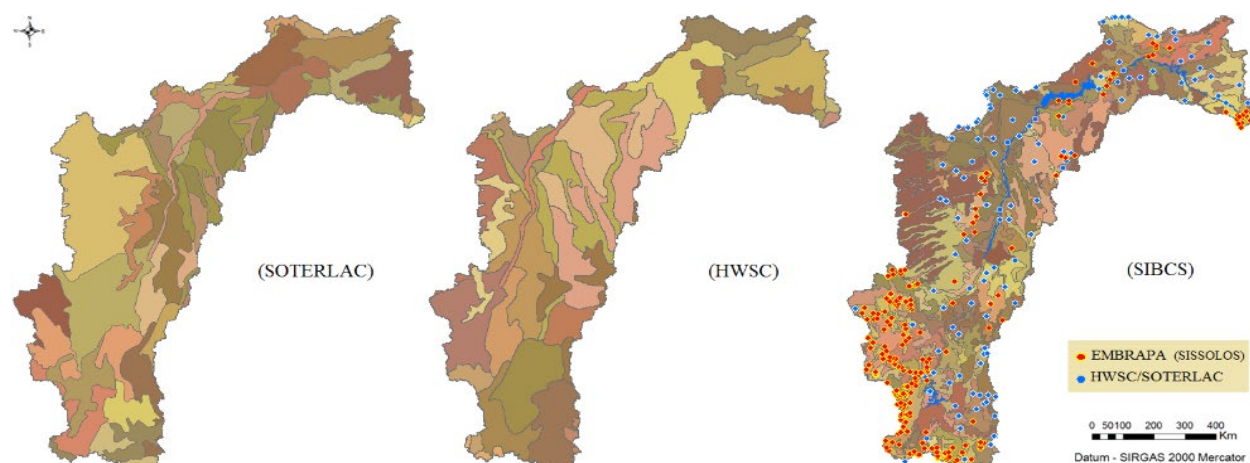
FIGURA 5.2. Economia do Brasil no Século XVIII; carta de época *Zone Economique* (1952) e Expansão da Agricultura nas últimas décadas.



Fontes: Rumsey (2017); Goedert (2017) - Modificado.

Um trabalho de *Data Mining* também foi necessário para se obter aos dados de entrada para simulação, através de pequenos programas de tratamento de dados em R e Pascal. Para os dados diários de chuva, que é a variável de entrada mais crítica para a grande maioria dos modelos hidrológicos, constatou-se que de 3510 estações listadas na região da bacia, apenas 1155 estações contêm dados de chuva, conforme os algoritmos desenvolvidos.

FIGURA 5.3. Cartas de solos SOTERLAC, HWSC e SIBCS(EMBRAPA, 2006)

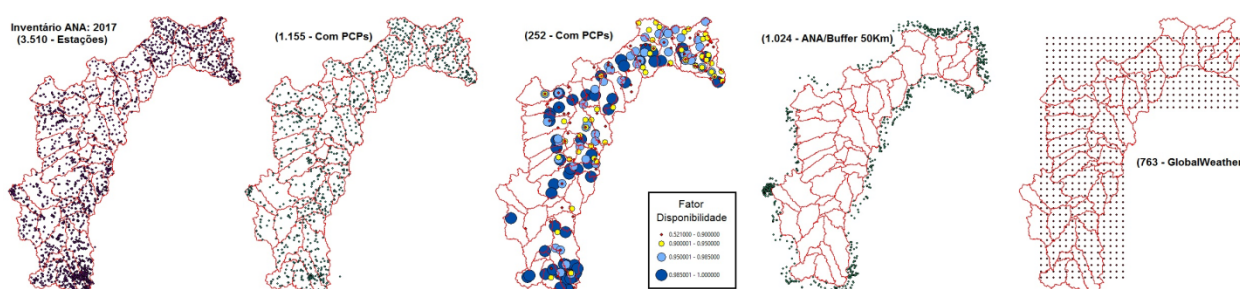


Fontes: ISRIC (2017); FAO (2017); MMA (2015)

O monitoramento da região teve início logo na primeira década de 1900 até os dias atuais, demonstrando sempre grande variação do número de estações operando a cada momento, seja por defeitos ou por desativação. Assim, também foram desenvolvidas técnicas SIG para a identificação das estações pela qualidade e extensão de suas séries, Figura 5.4.

A disponibilidade de dados de chuva foi o fator mais restritivo ao bom ajuste do cenário da década de 1950, para a qual foram encontradas 143 estações com dados de chuva sem falhas de registro, contudo, tais estações estão distribuídas em áreas compreendidas por somente metade das 51 sub-bacias delineadas via ArcSWAT.

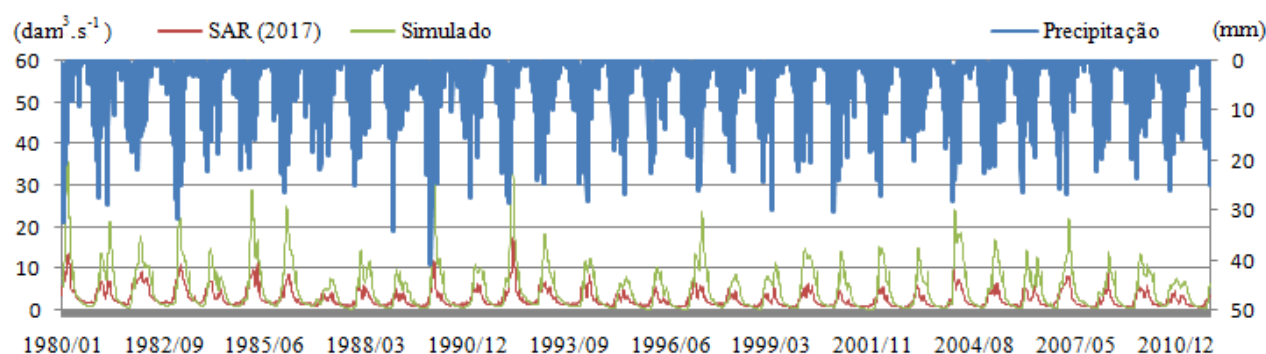
FIGURA 5.4. Seleção das Estações de Chuva



Fonte: ANA (2017)

Abbaspour (2013), deixa claro que a modelagem inversa está preocupada com o problema de fazer inferências sobre os sistemas físicos a partir das variáveis de saída do modelo (por exemplo, descarga do rio, concentração de sedimento), mas como quase todas as medidas estão sujeitas a alguma incerteza, qualquer inferência é de natureza estatística. Na Figura 5.5, vê-se o ajuste da validação (XAVIER, 2015; TAMU, 2017), onde a precipitação é a média entre 36 estações.

FIGURA 5.5. Validação da Produção de água entre os anos de 1980 a 2010.



Fontes: Xavier (2015); ONS (2016); TAMU (2017)

O resultado da calibração é coerente para fins de estudos e reconhecimento da bacia. O exercício realizado na validação, por sua vez pode demonstrar que os dados de vazão sintéticos

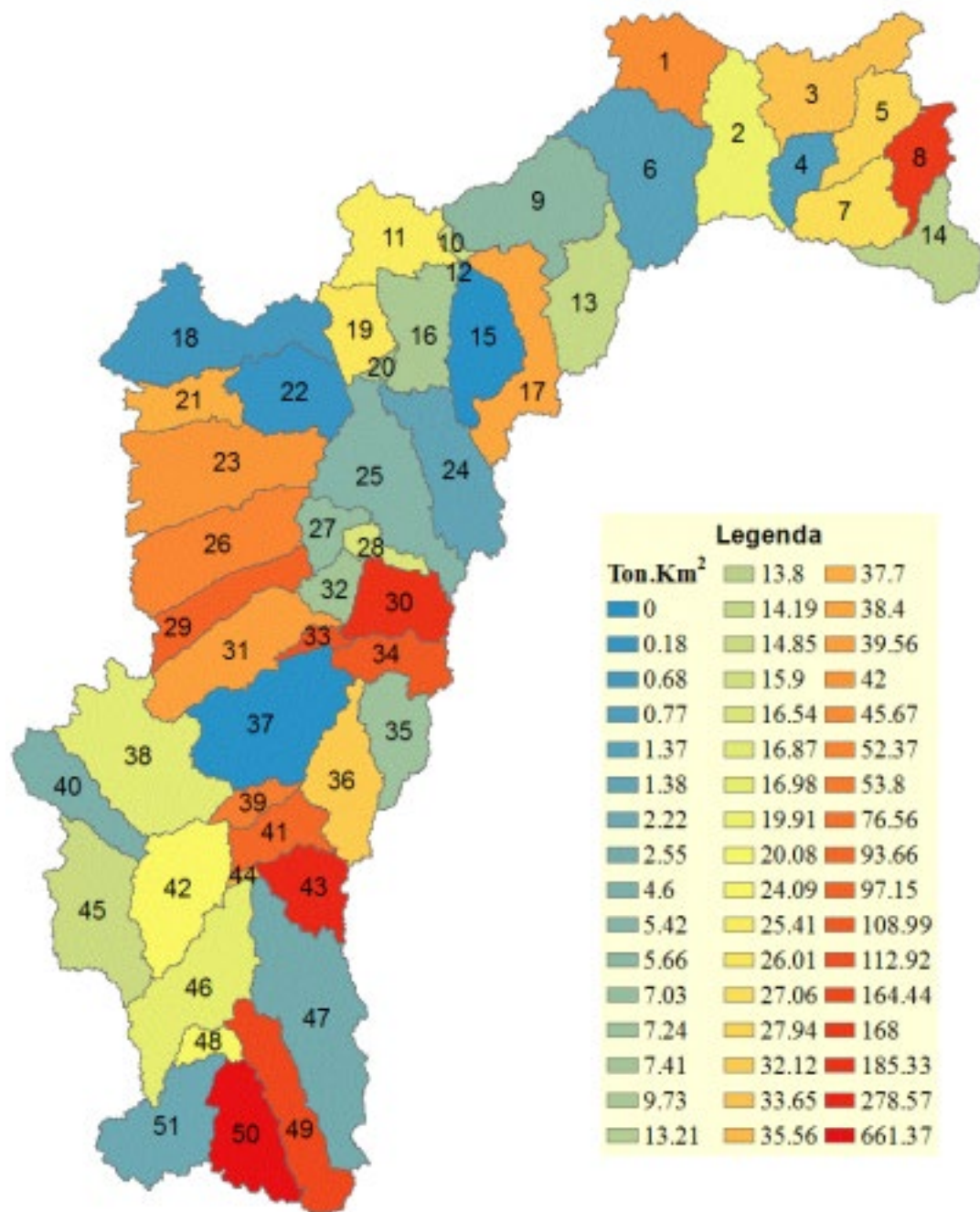
do ONS (2016) preservam informação de valor sobre as vazões do rio São Francisco, do mesmo modo, os dados da precipitação de Xavier (2015) demonstram-se qualificados para aquelas coordenadas das estações da ANA, consideradas no estudo. Os dados GlobalWeather (TAMU, 2017), que tratam das demais variáveis ambientais de entrada do SWAT, apresentam-se sem falhas para processamento via ArcSWAT e mantiveram ótima coerência nas respostas de vazão no período validativo.

O modelo ficou ajustado ao comportamento geral da vazão do rio São Francisco, apresentando ângulos na ascensão e na recessão mais acentuados que os apresentados pelas vazões do ONS (2016), o que se reflete nas suas amplitudes máximas e mínimas simuladas. Destarte às questões relativas à qualidade do ajuste, pode-se explorar as saídas geradas pelo modelo, a exemplo das estimativas da produtividade média anual de sedimentos nas sub-bacias do rio São Francisco, Figura 5.6, que podem ser encontradas no arquivo *Output.std* na pasta *TxtInOut*. O poder informativo obtido a partir de tais saídas é decisório nos momentos deliberativos nas tomadas de decisão quanto ao planejamento dos usos alternativos das terras de forma sustentável e mais inteligente. Pode-se agregar ainda maior valor às informações, a partir de detalhamentos encontrados em *Output.sed*.

A distribuição temporal da produção de sedimentos é vista na Figura 5.7, onde é possível observar que em 2004 ocorrera um evento extremo, jamais registrado no período. Este evento chamou a atenção, pois se esperavam ocorrências mais elevadas na produção de sedimentos, como se pode observar na Figura 5.5, o ajuste da produção de água não conseguiu corrigir picos extremos do escoamento superficial, onde os maiores eventos foram registrados no início de 1990 e de 1992. Vê-se que 2004 também apresentara uma elevada produção de água, contudo bastante inferior a dos dois anos citados, não sendo então esperada a anomalia visualizada no gráfico (2000b) da figura 5.7.

O evento específico foi identificado a partir do arquivo *Output.sed*, em *TxtInOut*, como decorrência da chuva do dia 19 de janeiro daquele ano. A eliminação do registro extremo foi feita a fim de melhorar a visualização da década, gráfico (2000a). Tornou-se evidente assim que uma elevada produção de sedimentos pode estar associada a um evento extremo de chuva local, não estando associado a um aumento da vazão na calha principal da bacia. Isto pode ser observado nos anos de 1988, 1994, 1999 e 2006, nos gráficos da figura 5.7. Estes eventos podem, do mesmo modo, ser identificados e detalhados a partir do isolamento das respectivas ocorrências extremas locais.

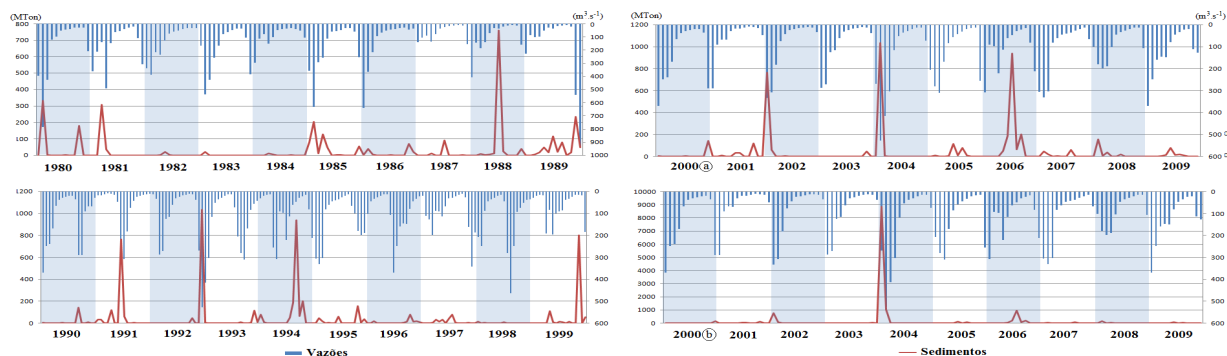
FIGURA 5.6. Produtividade média anual de sedimentos nas sub-bacias do rio São Francisco, no período de 1980 a 2010.



Conforme Alves *et al.* (2017), a anomalia climática de 2004 ocorrera em algumas áreas do semi-árido, com valores superiores a 100%. Naquele dia, os jornais noticiaram “mortes e inundações” (GLOBO, 2014). Tais ocorrências podem tomar proporções ainda mais dramáticas se ocorrerem após longas secas, pois as áreas inundáveis poderão estar ocupadas e não estão disponíveis mecanismos para o alerta de emergências. Sozinho, o SWAT não somente

identificou precisamente um evento extremo, como também as principais sub-bacias do Velho Chico afetadas, onde a n°8 foi a principal delas.

Figura 5.7 - Distribuição temporal da Produção de sedimentos do rio São Francisco



5.4. Considerações Finais

A bacia hidrográfica do rio São Francisco apresenta problemas que serão melhor e mais rapidamente compreendidos a partir de modelos que adotem o paradigma *Big Data*.

O ArcSWAT é uma ferramenta que poderá se tornar ainda mais eficaz incorporando-se ao paradigma *Big Data*, numa arquitetura em camadas. No caso do SWAT, o desafio será vencer a força com que está preso à sua estrutura de dados.

5.5. Referências

- ABBASPOUR, K.C. **User manual for SWAT-CUP**. Eawag: Swiss Fed. Inst. of Aquat. **Sci. and Technol.**, Duebendorf, Switzerland. 2013. 103 pp.
- ALVES, J. M. B.; SILVA, E. M.; SOMBRAL, S. S.; BARBOSA, A. C. B.; SANTOS, A. C. S.; LIRA, M. A. T. Eventos Extremos Diários de Chuva no Nordeste do Brasil e Características Atmosféricas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.32, n.2, p.227-233, 2017.
- ANA - Agência Nacional de Águas. **Dados da rede pluviográfica e fluviográfica**. Disponível em: <http://hidroweb.ana.gov.br/>, Acesso em 05/10/2017.
- ANA - Agência Nacional de Águas. **Sala de Situação da bacia hidrográfica do rio São Francisco**. Disponível em: < http://www3.ana.gov.br/porta1/ANA/sala-de-situacao/sao-francisco/boletins/diario/sf_bol_diario_27_02_2018.pdf>, Acesso em 05/10/2017.
- ARAÚJO, J. S.; PEREIRA DE SÁ, M. F. Sustentabilidade da piscicultura no baixo São Francisco alagoano: condicionantes socioeconômicos. **Revista Ambiente & Sociedade**, v. XI, n.2, p.405-424, 2008.

ARAÚJO, S. S.; AGUIAR NETTO, A. O.; GOMES, L. J. A percepção ambiental, identidade e pertencimento dos moradores do povoado Cabeço, em Brejo Grande/SE, frente às inundações na foz do rio São Francisco. **Revista Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 36,n.239-253, 2016.

ARNOLD, J. G. et al. Large area hydrologic modeling and assessment. Part I: Model development. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 34, n.1, p.73-89, 1998.

ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; SRINIVASAN, R.; WILLIAMS, J. R.; HANEY, E. B.;NEITSCH, S. L. **Soil and Water Assessment Tool -Input/Output Documentation: Version2012**. Texas, 2012. 650p

BAUMER, O.W. Prediction of soil hydraulic parameters. In: **WEPP Data Files for Indiana**. SCS - National Soil Survey Laboratory,1990.

CARMO, E. J.; RODRIGUES, D. D.; SANTOS, G. R. Avaliação dos interpoladores krigagem e topo to raster para geração de modelos digitais de elevação a partir de um “as built”. **Boletim Ciênc. Geod.**, Curitiba, v.21, n.4, p.674-690, 2015.

CBHSF, Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. **RF3-Resumo executivo do Plano de Recursos Hídricos da bacia hidrográfica do rio São Francisco 2016-2025**. Alagoas, 2016. 300p.

CIAT, International Centre for Tropical Agriculture. **Hole-filled seamless SRTM data V4**. Disponível em: <<http://srtm.csi.cgiar.org>>. Acesso em: 12/02/17.

CREECH, C.T.; SIQUEIRA, R.B.; SELEGEAN, J.P.; MILLER, C. Anthropogenic impacts to the sediment budget of São Francisco River navigation channel using SWAT. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 8, p.140-157, 2015.

EMBRAPA - CNPS. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro: Embrapa-Solos, 2006. 306 p.

EMBRAPA - **Sisolos**. Disponível em: <<http://www.sisolos.cnptia.embrapa.br>> Acesso em: 26/10/2015.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Súmula da 10ª. Reunião Técnica de Levantamento de Solos**. Rio de Janeiro, 1979. 83p. (Miscelânea, 1).

FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Banco de dados e mapas de solos**. Disponível em: <<http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/en/>>. Acesso em: 20/03/2017.

GLOBO, Rede de televisões. **Jornal Nacional**. Edição do dia 19/01/2004: Mortes e inundações. Disponível em: <<http://jornalnacional.globo.com/Telejornais/JN/0,,MUL552633-10406,00-MORTES+E+INUNDACOES.html>> Acesso em: 15/02/2018.

GOEDERT, W. **Expansão da Agricultura**. Slide 3. Disponível em: <slideplayer.com.br/slide/10660412>. Acesso em: 27/12/2017.

GUIDOLIN, M., CHEN, A.S., GHIMIRE, B., KEEDWELL, E.C., DJORDJEVIĆ, S., SAVIĆ, D.A. A weighted cellular automata 2D inundation model for rapid flood analysis. *Environmental Modelling & Software*. 2016.

GUO, XI; WANG, B.; XIONG, W.; JIN, S. **SWAT Hydrological Model and Big Data Techniques**. In: 5GWN of ICST, K. Long et al. (Eds.), p.79-88, 2018.

ISHWARAPPA, K., & ANURADHA, J. A Brief Introduction on Big Data 5Vs Characteristics and Hadoop Technology. **Procedia Computer Science**, 2015.

ISRIC - **International Soil Reference and Information Center**. Disponível em: <http://geonode.isric.org/layers/geonode:soter_lac_map_unit>. Acesso em: 15/03/2017)

JONES, A.S., J.S. HORSBURGH, D. JACKSON-SMITH, M. RAMIREZ, C.G. FLINT, AND J. CARABALLO. A Web-Based, Interactive Visualization Tool for Social Environmental Survey Data. **Environmental Modelling & Software**, v. 84, p.412-426, 2016.

LIU, NING. Emergence, Concept, and Understanding of Pan-River-Basin (PRB). *International Soil and Water Conservation Research*. 2015.

MEDEIROS, P. R. P.; KNOPPERS, B. A.; SANTOS JÚNIOR, R. C.; SOUZA, W.F.L. Aporte Fluvial e Dispersão de Matéria Particulada em Suspensão na zona costeira do rio São Francisco (se/al). **Geochimica Brasiliensis**, v.21, p.212 - 231, 2007.

MMA - **Ministério do Meio Ambiente. Página de acesso a dados**. Disponível em: <<http://mapas.mma.gov.br/i3geo/datadownload.htm>>. Acesso em: 05/10/2015.

ONS, **Atualização de Séries Históricas de Vazões – Período 1931 a 2015**, RE ONS 0181/2016, 2016.

RUMSEY (2017), *David Rumsey Historical Map Collection*. Disponível em: <<https://www.davidrumsey.com>>. Acesso em: 26/12/2017.

SAXTON, K. E.; RAWLS, W. J. Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. Madison(USA). **Journal Soil Science Society of America**, v.70, p.1569-1578, 2006.

SENTHIVALDIUS, S., KIRAN, S.V., DEVI, S.P., MANIVANNAN, S.: Big data analysis on geographical segmentations and resource constrained scheduling of production of agricultural commodities for better yield. **Procedia Computer Science**, v.87, p80–85, 2016.

TAMU, **Texas A&M University - Global Weather Data - GlobalWeather**. Disponível em: <<https://globalweather.tamu.edu>>. Acesso em: 09/06/2017.

TAMU, **Texas A&M University - Hydrologic and Water Quality System (HAWQS)**. Disponível em: <<https://epahawqs.tamu.edu/content/docs/HAWQS-Flyer.pdf>> Acesso em: 26/02/2018.

TAMU, **Texas A&M University - Sistema de Unidades de resposta hidrológica para Pernambuco (SUPER)**. Acesso em: 26/02/2018.

TAMU, **Texas A&M University - Soil & Water Assessment Tool (SWAT) - Softwares**. Disponível em: < <https://swat.tamu.edu/software/>>. Acesso em: 09/07/2013.

TONIAL, L.S.S. Estrutura populacional do Camarão Sete-Barbas *Xiphopenaeus kroyeri* (HELLER, 1862) na Foz do rio São Francisco, Nordeste do Brasil. Dissertação (Mestrado em Diversidade Biológicas e da Saúde), 2011. 66p..

US EPA (2016). HAWQS 1.0 Beta (Hydrologic and Water Quality System) Modeling Framework. **Office of Water**. Washington, D.C. <https://www.epa.gov/hawqs>. Acessado em: 26/08/2018.

USGS, **Earth Resources Observation and Science (EROS) Center Archive - U.S. Geological Survey (USGS) - Earthexplorer**. Disponível em: <<https://earthexplorer.usgs.gov>>. Acesso em: 03/03/2017.

VAIRAVAMOORTHY K., ECKART J., TSEGAYE S., GHEBREMICHAEL K., KHATRI K. A Paradigm Shift in Urban Water Management: An Imperative to Achieve Sustainability. In: **Sustainability of Integrated Water Resources Management**. Springer, Cham, 2016.

WISCHMEIER, W.H., JOHNSON, C.B., CROSS, B.V. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. **Journal Soil Water Conservation**, v.26, p.189-193, 1971.

XAVIER, A. C.; KING, CAREY W. S.; BRIDGET R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980-2013), **International Journal of Climatology**, v. 36, n.6, p.2644-2659, 2015.

YEN H., AHMADI M., WANG X., Arnold J. G. C-SWAT: The Soil and Water Assessment Tool with Consolidated Input Files in Alleviating Computational Burden of Recursive Simulations. **Computers & Geosciences**, v.72, p.221–232, 2014.

CAPÍTULO 6 - MODELAGEM CHUVA-VAZÃO DO RIO SÃO FRANCISCO, COM ÊNFASE NAS BARRAGENS, POR MEIO DO TANK MODEL

6.1. Introdução

Nos dias atuais, a construção de modelos matemáticos para a interpretação de fenômenos físicos é de grande valia na obtenção de informações acerca do ciclo hidrológico de locais em específico e de rios e bacias hidrográficas em geral, agindo como uma ferramenta que visa suprir a assimetria de informação que é inerente às análises do ciclo hidrológico e outros fenômenos. Para a gestão das águas deve-se ter, ao menos, o conhecimento do funcionamento dos recursos naturais em uma área, na sua capacidade de produção e reprodução das quantidades com as qualidades desejadas.

O Brasil é o país com maior porcentagem da água doce per capita do mundo, o que consequentemente deveria criar condições para um cenário de maior eficiência de políticas públicas e de maior responsabilidade das empresas privadas com os recursos naturais. Nesse sentido, a modelagem hidrológica deverá assumir um papel-chave neste processo, cumprindo a função de gerar informação, o que por sua vez, gera valor para a sociedade em geral.

Em contra partida, o rio São Francisco encontra dificuldades para atender às múltiplas demandas, vivenciando um período de crise hídrica que tem sido atribuído à diminuição das chuvas. A crise atual apresenta a maior duração e intensidade desde o advento das grandes barragens. Reconhece-se como seu início a data 01/04/13, quando se autorizou a redução (pioneira) das defluências do seu sistema hidroelétrico de $1300 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ para $1.100 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. Outras autorizações se seguiram, tendo sido a última, a Resolução nº 51/2018 da ANA, publicada no Diário Oficial da União em 01/08/2018 prorrogando, até 30/11/2018, a manutenção da vazão média diária defluente para $550 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ e a instantânea para $523 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, a partir dos reservatórios de Sobradinho e Xingó (ANA 2018).

Considerando-se a complexidade da relação homem-ambiente, já que a hidrologia não pode ser percebida como algo que é dado na sua forma mínima, naquilo que seria a pluri (ou multi) disciplinaridade, que supõe colocá-la em conjunto, estabelecer algum tipo de coordenação numa perspectiva de mero paralelismo de pontos de vista, e sim como algo que, quando se ultrapassa essa dimensão, avança no sentido de uma combinação, de uma convergência, de uma complementaridade que remete ao terreno da interdisciplinaridade, conforme aponta Piaget (1972), torna-se importante nesse contexto, a questão da fecundação recíproca das disciplinas, da

transferência de conceitos, de problemáticas, de métodos com vista a uma leitura mais rica da realidade.

6.2. Revisão de Literatura

Num contexto internacional, pode-se perceber o Brasil a partir de suas características hidrológicas, geológicas e climáticas diversas, mas também conforme Rebouças (2002), das formas desordenadas de uso e ocupação do território que engendram o agravamento dos efeitos das secas e das enchentes que atingem as populações e suas atividades econômicas.

Conforme Pinto *et al.* (2015), nas bacias hidrográficas localizadas nas regiões tropicais, o papel do clima é de regulador socioeconômico, especialmente daquelas dependentes de tecnologias, e interfere reconhecidamente na qualidade de vida de seu povo. Entende-se, que ao se analisar a variabilidade climática, a pluviosidade é o elemento climático mais significativo. Isto porque, nas baixas latitudes, a precipitação pluvial é conhecida como altamente variável em suas incidência e intensidade. Os eventos extremos, secas e inundações, estarão sempre entre os elementos climáticos significativos.

A bacia hidrográfica do São Francisco está entre as doze regiões hidrográficas instituídas pela Resolução 32, de 15 de outubro de 2003, do Conselho Nacional de Recursos Hídricos, que definiu a Divisão Hidrográfica Nacional com a finalidade de orientar, fundamentar e implementar o Plano Nacional de Recursos Hídricos (PNRH). Na presente tese, o objeto de estudo é a bacia do São Francisco, que é de importância regional, dos pontos de vista ecológico e social, e nacional, nos campos político e econômico.

Como observado por Muehe (2006), os rios têm importância vital na geoquímica dos oceanos, pois são importantes agentes transportadores de sedimentos e nutrientes. Entretanto, existem diversas atividades humanas que alteram esse transporte natural, dentre as quais se destaca a construção de barragens. O conhecimento dos dados hidrometeorológicos de longo período é de utilidade para os órgãos de defesa civil, ambientais e de recursos hídricos (LINDNER, 2007). Porém, muitas vezes, esses dados registrados apresentam falhas ou períodos curtos de medição, principalmente no caso das vazões, onde o preenchimento de tais falhas é uma alternativa.

Nos modelos chuva-vazão, a chuva é a variável de entrada, ou seja, é a variável independente e a vazão que é saída do modelo, é variável e dependente. As saídas de um modelo são obtidas a partir dos valores de entrada quando condicionados aos ajustes de parâmetros de

um modelo calibrado. São os parâmetros do modelo que abarcam a complexidade das características físicas da bacia hidrográfica para a qual tenham sido feitos seus ajustes. No caso do modelo Tank Model, as variáveis de entrada são a chuva e a evapotranspiração real (ETR) (SUGAWARA, 1961, 1972, 1979, 1984, 1986, 1995; SUZUKI, 1997; OLIVEIRA, 1999; LINDNER; KOBIYAMA, 2009; LARA; KOBIYAMA, 2012; NUNES *et al.*, 2014; VASCONCELLOS *et al.*, 2018). Contudo, o modelo é capaz de obter ajustes até razoáveis mesmo nas situações em que não se há ETR, ou ainda, esta pode ser estimada (OLIVEIRA, 1999).

O Tank Model é um modelo muito robusto e eficiente para geração de séries de vazões. Ele pode apresentar um número variável de parâmetros de ajuste, pois como informa Kobiyama (2013), a estrutura com quatro reservatórios é normalmente utilizada quando se trabalha com dados hidrológicos diários e o objetivo é analisar vazões de longo período. De acordo com Sugawara (1995), nas análises em que o intervalo de tempo simulado for de apenas algumas horas, como na previsão de enchentes, o usual é utilizar uma estrutura com apenas dois tanques, onde o terceiro e o quarto tanques podem ser desconsiderados, pois nesse caso o escoamento destes reservatórios inferiores representa uma fração desprezível frente à vazão total escoada na ocorrência das cheias.

De forma mais geral, segundo Sittner (1976), o Tank Model é muito flexível e adaptável, podendo o número de reservatórios ser trocado, na posição vertical ou mesmo horizontal, se necessário, para refletir as condições de uma bacia hidrográfica em particular. Sugawara (1995) esclarece que é devido a esta flexibilidade que faz com que o modelo Tank Model possa ser ajustado para praticamente qualquer tipo de bacia hidrográfica, submetidas às mais diferentes intensidades e tipos de eventos hídricos.

Diante do problema da grave crise hídrica que se desenrola na bacia hidrográfica do rio São Francisco e da importância elevadíssima dos dados de vazão para a calibração de modelos distribuídos, são desenvolvidas diferentes técnicas e ferramentas para que se possa lidar com a complexidade inerente e trazer dados de valor para a comunidade científica que, por sua vez, irá pautar decisões que trarão retornos às comunidades via políticas públicas. A modelagem matemática entra nesse contexto como ferramenta utilizada no conhecimento mais aprofundado dos fenômenos físicos envolvidos e previsão de cenários (MORAES *et al.*, 2003), permitindo a percepção objetiva das interrelações que formam o sistema hidrológico.

Assim, a gestão ambiental enquanto meio de promoção do desenvolvimento sustentável, encontra caráter prático na gestão de recursos hídricos e de bacias hidrográficas, e pode contribuir para uma evolução rumo a um ecodesenvolvimento. Segundo Vieira (1995), ela é útil na consecução de estratégias que compatibilizem viabilidade econômica, equidade social, autonomia política e, sobretudo, prudência ecológica.

Na modelagem com Tank Model, o conceito básico do modelo de tanque é analógico, "imitando" a compartimentalização do fluxo e armazenamento d'água ao longo da estratificação natural dos solos, substituindo-as por armazenamentos que são descritos como uma série de tanques (geralmente de 2 a 4) superpostos verticalmente, em sequência. A teoria do modelo hidrológico denominado Tank Model foi desenvolvida por Sugawara em 1961, (SUGAWARA *et al.*, 1961, 1979, 1984, 1986, 1995). Ele pode ser considerado um modelo determinístico, concentrado, conceitual, de multicomponentes e não-linear (SUGAWARA, 1995; OLIVEIRA, 1999).

Em um modelo concentrado, todos os parâmetros e variáveis representam valores médios de toda a área de captação. A bacia hidrográfica é substituída por vários tanques, e a saída ou a forma de infiltração de cada tanque é considerada proporcional à altura da água a partir da posição do orifício de descarga ou infiltração. A profundidade da água do tanque é assumida como sendo o armazenamento na bacia (SUZUKI, 1997).

A modelagem com o Tank Model, caracteriza-se por apresentar uma estrutura simples e de fácil implementação, sendo a mais indicada para análise de períodos longos, como os intervalos mensais. (MENDES *et al.*, 2007). Lindner (2007), também declara que o Tank Model é escolhido frequentemente pela sua simplicidade e que sua estrutura permite arranjos que o tornam compatível com as peculiaridades das bacias. Lara e Kobiyama, (2012), alertam que, muito embora o modelo pareça simples, há problemas para se fazer a sua calibração em virtude da arbitrariedade na obtenção dos parâmetros de ajuste. Devido a isso, há um elevado grau de incerteza vinculado ao ajuste desse modelo. Ajustes aceitáveis dependem da habilidade do modelador e/ou de técnicas de auto calibração.

Por outro lado, Sittner (1976) informa que o modelo Tank Model é classificado como um modelo de contabilidade de umidade implícita, ou seja, apresenta a capacidade de adaptar-se de modo que dados de inferior qualidade são "filtrados" na calibração. Essa qualidade faz com que respondam com menores erros na fase de verificação/validação, propiciando, dessa forma,

melhores resultados para previsão do que os modelos com contabilidade de umidade explícita, ou seja, que dependem de equações específicas que descrevam a umidade.

Entende-se ainda ser necessária uma avaliação estatística adequada de qualquer produto de simulação, qualquer que tenha sido o modelo utilizado na sua produção. No presente trabalho, portanto, será apresentado o resultado da modelagem com Tank Model da bacia hidrográfica do rio São Francisco, compreendido desde suas nascentes até a altura do município de Pão de Açúcar/AL, a partir dos valores diários simulados pelo modelo Tank Model calibrado e validado, como também das avaliações da AED relativas aos dados empíricos de precipitação e de vazão utilizados e da AED dos dados da reconstituição das vazões naturais da ONS (ONS, 2016) frente às vazões TKM. Demandará para tanto, o uso da técnica de polígonos de Thiessen, a partir da qual serão gerados os valores (diários) de chuva, que é sua principal variável de entrada.

Tratando-se da interface computacional desenvolvida para o modelo Tank Model, a qual se adotou denominar TKM, destaca-se a capacidade de modificação do nível de sensibilidade de ajuste dos parâmetros, em tempo real, o que propicia facilidade na calibração manual do modelo. Será abordado o processo de coleta de dados, calibração e validação do supracitado modelo no próximo tópico. Por fim, foram debatidas as implicações teóricas advindas dos métodos, técnicas e ferramentas utilizadas, tais como os problemas na obtenção de dados e sobre sua qualidade.

6.3. METODOLOGIA

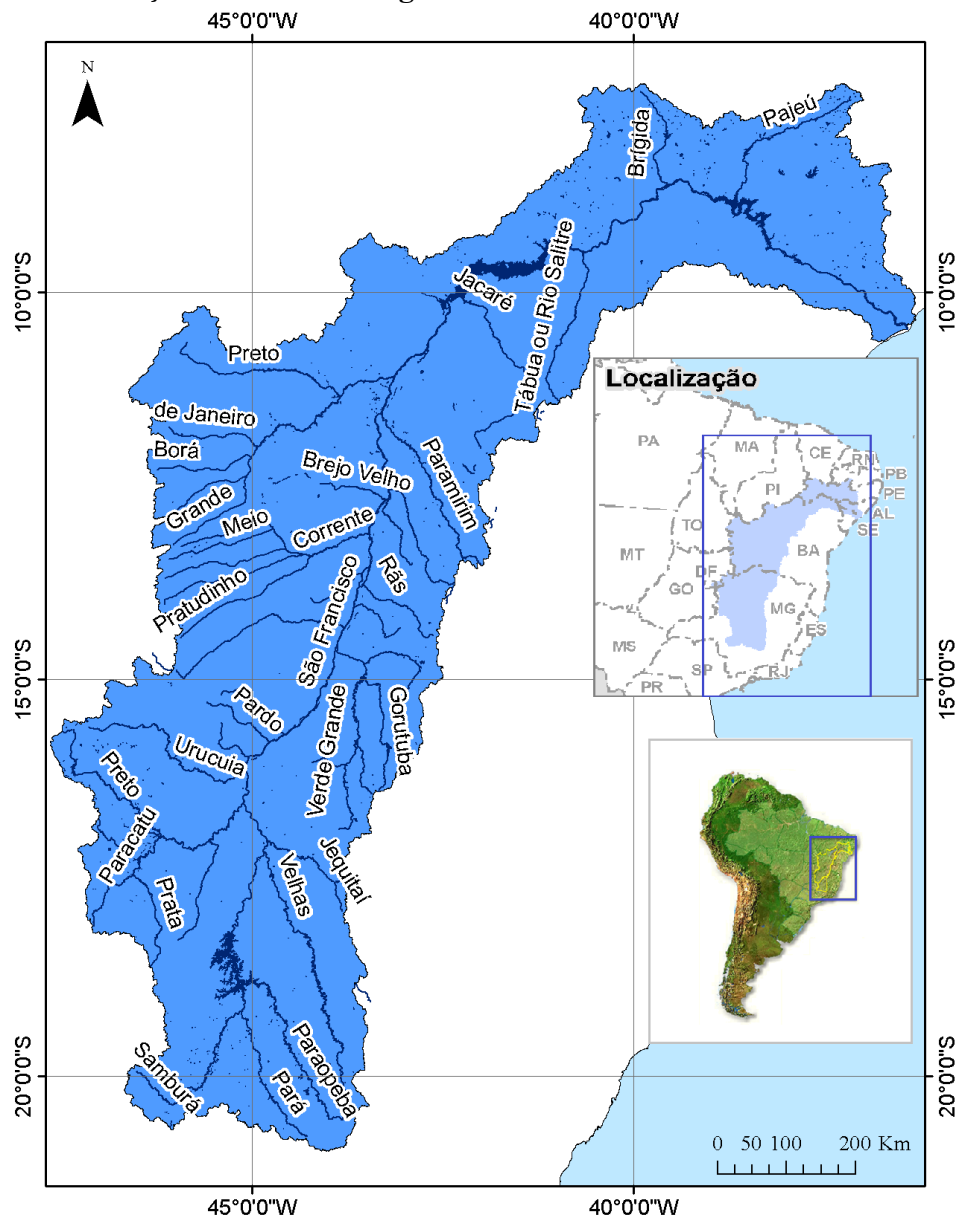
6.3.1. O rio São Francisco

Na Figura 6.1 vê-se uma representação da rede de drenagem do rio São Francisco que se estende por uma área de 639,219 Km², 7,5% do território brasileiro, percorrendo regiões com variadas condições socioambientais e tendo usos diversos, tais como a geração de energia, consumo, lazer, turismo, agricultura, indústria e piscicultura, sofrendo alterações relativas ao volume e à qualidade de suas águas em sua extensão. A bacia apresenta quatro subdivisões: Alto, Médio, Sub-médio e Baixo que sofrem de profundos contrastes socioeconômicos e grande vulnerabilidade ambiental (CBHSF, 2015).

Conforme Fernandes (2015), o vale do São Francisco é uma depressão alongada que parte do extremo sul, na Serra da Canastra, margeado pela Serra do Espinhaço a leste e Serra Geral de Goiás a oeste, com altitudes variando entre 1.000 e 1.300 metros do nível do mar. No final do Médio São Francisco, o curso d'água encontra-se com a Serra da Tabatinga, ao norte, cujas alturas são de 800 a 1.000 metros, sendo divisor com o vale do Parnaíba, no Piauí. Nesse ponto, o

vale do São Francisco toma a direção leste, sendo margeado ao norte pela chapada do Araripe, divisor de águas com o vale do Cariri no Ceará e ao sul limitado pelas Bacias de Tucano e Vaz-Barris, divisores de águas com o raso da Catarina na Bahia. Na região do baixo, o rio São Francisco segue até a sua foz tendo seus divisores de águas com as bacias do rio Japaratuba, em Sergipe, ao sul e do rio Coruripe em Alagoas, ao norte.

Figura 6.1 – Localização da bacia hidrográfica do rio São Francisco



Fonte: (CBHSF, 2015; MMA, 2016 - Modificado)

Duas dentre as 10 maiores usinas hidrelétricas do Brasil (em MW) estão no São Francisco: Xingó e Paulo Afonso IV. O volume de água acumulado nos reservatórios do rio São Francisco é de aproximadamente 68 bilhões de m³, sendo Sobradinho responsável por cerca de

50% do volume total. Segundo Oliveira (2003), o rio apresenta uma vazão média anual de $2.850 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, exibindo uma das maiores descargas líquidas do Brasil. Contudo, o rendimento de sedimento por área é um dos menores, devido à construção de barragens em cascata. Dos afluentes que contribuem para suas vazões, 51% são intermitentes.

A bacia abrange 505 municípios, aproximadamente 9% do total de municípios do país. Desse total, 48,2% estão na Bahia, 36,8% em Minas Gerais, 10,9% em Pernambuco, 2,2% em Alagoas, 1,2% em Sergipe, 0,5% em Goiás e 0,2% no Distrito Federal. Junto ao leito principal do rio ficam situados 101 (20%) dos municípios da bacia. O crescimento populacional da região se apresenta da seguinte forma: 9 milhões no censo de 1996 (LIMA, 2001); 13.297.955 habitantes no censo do ano 2000 (MMA, 2011), correspondendo a pouco mais de 8% da população brasileira; 16,5 milhões de habitantes no censo de 2010, aproximadamente 8,1% dos brasileiros. O PIB regional é de R\$ 264 bi, aproximadamente 6% do montante nacional. (CBHSF, 2015).

Lima (2001), apresentou o valor da área ocupada com irrigação como sendo de aproximadamente 330.000 ha e já no ano de 2012 esta área se ampliara cerca de 90%, passando a 626.941 ha, onde metade está localizada no extremo oeste baiano e no Vale São Franciscano da Bahia (225.574 ha e 88.232 ha, respectivamente), representada principalmente pela expansão das commodities: milho e soja. (CBHSF, 2015).

O Alto São Francisco demanda 90% da vazão retirada da bacia para uso industrial, dada a magnitude e diversidade do setor na região metropolitana de Belo Horizonte. A indústria e mineração consomem 5% da vazão total retirada na bacia, o abastecimento urbano consome outros 7%. A irrigação apresenta forte consumo hídrico, representando 77% da vazão total retirada. Em termo de volumes outorgados, a irrigação é a maior consumidora geral com 556,6 dos $723,4 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ da vazão máxima outorgada na bacia (CBHSF, 2015).

O valor médio da turbinação para geração de energia hidroelétrica é de $2.000 \text{ m}^3/\text{s}^{-1}$. Assim, a hidroeletricidade tem mantido o seu papel preponderante como fonte primária de energia elétrica, mas começando a haver um decréscimo de 77 para 67% na sua contribuição entre 2006 e 2014. Esta tendência de queda deverá ser mantida, onde o potencial da bacia é de 22.596 MW, o que situa o aproveitamento atual na ordem de apenas 47% (Idem).

Apesar de a vazão média do rio ser de aproximadamente $2.850 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, com o advento da atual crise hídrica que se desenrola na bacia do rio São Francisco, o valor médio apresentado no

período compreendido entre os anos de 2013 a 2016, registrado pela estação Pão de Açúcar/AL é de $1068.69 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$.

6.3.2. Dados necessários aos modelos/Fontes de Dados

Os dados requeridos são os das variáveis de entrada: Evapotranspiração e Precipitação, ambos em $\text{mm}.\text{dia}^{-1}$, bem como os da variável de decisão: Vazão, em $\text{m}^3.\text{dia}^{-1}$. Segundo Naghettini e Pinto (2007) e Chaves (2014), no Brasil, as principais entidades produtoras de dados hidrológicos e hidrometeorológicos são a Agência Nacional de Águas (ANA), cuja parte da rede é operada pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM) e o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Os dados foram obtidos junto ao serviço da ANA, portal HIDROWEB, para o período de janeiro de 1910 a fevereiro de 2017 (ANA, 2017), através da linguagem R, com utilização do pacote HIDROWEBDOWN, sendo importante destacar que devido a mudanças na camada de aplicação do HIDROWEB, desde 19 de abril de 2018 não é mais possível sua utilização (GITHUB, 2018). As Estações fluviométricas consideradas na pesquisa foram: 49370000 - Pão de Açúcar; 46998000 - Barra; 44500000 - Manga. Quanto às estações de chuva, foram selecionadas através de SIG, 688 na área de entorno da bacia do rio São Francisco até uma distância de 50 Km e 1152 na área da bacia. Os dados da Evapotranspiração foram extraídos a partir de um modelo SWAT da bacia do rio São Francisco (apresentado no capítulo 5 da presente tese).

6.3.3. Pré-processamentos/Seleção dos Dados Ambientais

Os dados disponibilizados pelo HIDROWEB da ANA apresentam registros de vazões a partir do ano de 1931 para a estação de Pão de Açúcar/AL, de 1925 para a de Barra/BA e de 1932 para Manga/BA. As estações de vazão selecionadas não apresentavam falhas significativas de registro. São várias as questões consideradas na seleção dos dados diários de vazão. Contudo, os dados diários das chuvas são mais limitados por demandarem muito maior número de estações. Este foi um impedimento devido ao pequeno número de estações pluviométricas até por volta dos anos 40. Outra questão relativa aos dados de precipitação é que o seu tratamento é mais trabalhoso em virtude do grande número de estações envolvidas, por apresentar diversos tipos de falhas. Também, a técnica empregada na geração dos dados diários de chuva Thiessen, por ser semi-automática, consumiu grande quantidade de tempo em procedimentos mecânicos. Outro fator relevante para a escolha dos períodos foi a disponibilidade dos dados de vazão sem

interferência regulatória. A janela formada com dados de chuvas e de vazão suficientes para a modelagem hidrológica almejada compreende assim o período de 1941 a 1961.

O período compreendido entre 1941 a 1955 foi utilizado para a calibração do TKM e o período de 1956 a 1961 para sua validação. Após estes procedimentos de ajuste dos parâmetros, as vazões diárias simuladas pelo modelo referentes ao período entre 1941 a 2016, foram utilizadas para representar as vazões naturais. O ponto-chave aqui está no fato de as precipitações estarem fundamentadas nos dados reais de chuva, com uso da técnica de Thiessen - representando a média diária de chuva na bacia adequadamente. Outro ponto crucial é que a evapotranspiração foi obtida a partir das saídas do modelo SWAT (apresentado no capítulo anterior desta tese) de modo que se considerou o comportamento físico do solo e os aspectos biológicos da vegetação, além do que já se encontrava totalizada num valor único diário para toda a bacia facilitando enormemente o avanço dos trabalhos.

Após os procedimentos de calibração e validação, foram então simuladas as vazões diárias para o período de 1998 a 2016, que foram utilizadas na formação de agrupamentos representativos de secas e dos representativos de umidade no período. A escolha seguiu preferencialmente selecionando-se anos consecutivos para a formação dos grupos, que foram utilizados nas comparações com as vazões *in loco* registradas pela estação de monitoramento fluviométrico da ANA número 49370000, localizada em Pão de Açúcar, o que será mais detalhado adiante. É mister reiterar que as vazões, tanto de registro quanto as simuladas, puderam ser utilizadas na consecução de gráficos e testes estatísticos de interesse para todo o intervalo compreendido entre os anos de 1941 a 2016.

Inicialmente os dados diários de vazão, foram computados em médias mensais e anuais para viabilizar a realização dos testes estatísticos de aleatoriedade, autocorrelação, mudança de média e de tendência. Muitas análises, talvez as mais importantes, foram feitas através de gráficos, a exemplo do RAPS (*Rescaled Adjusted Partial Sums*), com o uso da linguagem de programação R (R CORE TEAM, 2015) e de planilhas de cálculo. Além das séries de vazões simuladas e da estação fluviométrica de Pão de Açúcar/AL, foram submetidas aos mesmos testes estatísticos as vazões reconstituídas oferecidas pelo ONS (2016).

Em relação aos dados de chuva, uma grande criteriosidade foi demandada em relação às avaliações das qualidades destes dados, não somente por se tratarem dos dados mais essenciais de entrada do modelo Tank Model, mas ainda em virtude da preocupação que Sugawara (1995)

apresentava acerca do uso da técnica de Thiessen para o cálculo da chuva média. Deste modo, a primeira opção foi procurar pela melhor técnica de preenchimento de falhas nos dados das estações, tendo-se em vista, que a princípio se considerava que somente seria possível a calibração satisfatória do modelo Tank Model de uma grande bacia, como a do rio São Francisco, subdividindo-a, com posterior roteamento das vazões. Porém, sempre haveria a preocupação de que ocorreriam estações sem dados de chuva ou mesmo ausência de estações na área de uma das sub-bacias nos períodos de interesse.

Além disso, o uso da técnica de preenchimento a partir da regressão linear ajustada para estações que mantenham correlação seria oneroso, considerando-se o universo de estações a serem trabalhadas e ainda porque, a nível de escala espacial, não seriam formadas sub-bacias tão pequenas, dada a magnitude do tamanho da bacia hidrográfica do rio São Francisco, o que resultaria no mesmo problema, ou seja, muitas estações para uma mesma sub-bacia e com isso a dúvida de qual seria a mais representativa, ou ainda, da melhor forma de se calcular uma média, o que retornaria à Thiessen.

Além disso, para a época anterior à construção de Três Marias, as estações de monitoramento da precipitação vão se tornando escassas, aumentando a presença de falhas nos dados. Por isso, conseqüentemente a preocupação torna-se maior, pois em relação ao problema de preencher as falhas nos dados de chuva, quanto menor o número de estações e maiores as distâncias entre as estações, menores as chances de guardarem alguma correlação.

Por isso, se optou por trabalhar o cálculo da média diária de chuva, para a área objeto da pesquisa, utilizando-se a técnica de Thiessen. A obtenção dos polígonos de Thiessen se deu através do uso do software de geoprocessamento SAGA (*System for Automated Geoscientific Analyses*). Após a obtenção dos polígonos, recortam-se os mesmos utilizando-se como máscara o polígono da bacia hidrográfica do rio São Francisco e, ainda com o auxílio de geoprocessamento, procede-se o cálculo das áreas das subáreas Thiessen. Finalmente, os valores obtidos para cada subárea são divididos pela área total da bacia, estimando seus fatores de proporção. Este processamento produziu máscaras de fator Thiessen mensais para o período compreendido entre 1941 a 2016, num total de 912 conjuntos de fatores de proporção para utilização nos cálculos das chuvas diárias.

Um pós-processamento é realizado, no qual o somatório dos produtos entre as chuvas do dia de cada estação e seus respectivos fatores de proporção de área Thiessen, gerarão cada valor

diário da chuva da bacia do São Francisco. Neste processo, caso ocorra falta de dados em alguma estação, o valor do dia faltante é preenchido pela respectiva média entre os valores registrados pelas demais estações consideradas no dia em questão.

Esta estratégia permitiu a obtenção de dados diários de chuvas sem falhas e representativos, uma vez que trabalhou sobre uma base de dados tratada preliminarmente, de forma onde somente foram consideradas as estações após remoção de todos os períodos anuais em que a precipitação acumulada fosse superior a 2800 mm, de todos os períodos mensais onde a precipitação acumulada fosse superior a 1000 mm, dos meses em que ocorreram valores diários idênticos, ≥ 5 mm, repetidos por mais de 4 dias consecutivos. Assim, não foram realizados procedimentos estatísticos para identificação das faixas de corte para eliminação dos *outliers*, em relação ao número de desvios. O fato de se ter mantido uma taxa de corte bastante elevada para os valores dos acumulados mensais deu-se em virtude do interesse em se manter os registros dos eventos mais extremos possíveis, mas com garantias advindas da consideração do ponto de corte bem mais rigoroso para os acumulados anuais.

6.3.4. Implementação de um modelo Tank

A criação de uma interface gráfica mínima, o TKM, com botões de rolagem, foi relativamente simples através do uso de IDEs (*Integrated Developer Enviroment*) que estão disponíveis para diversas linguagens de programação com versões livres. No presente estudo, utilizou-se IDE Delphi 7 *Standart Edition* da antiga Borland. Figura 6.2.

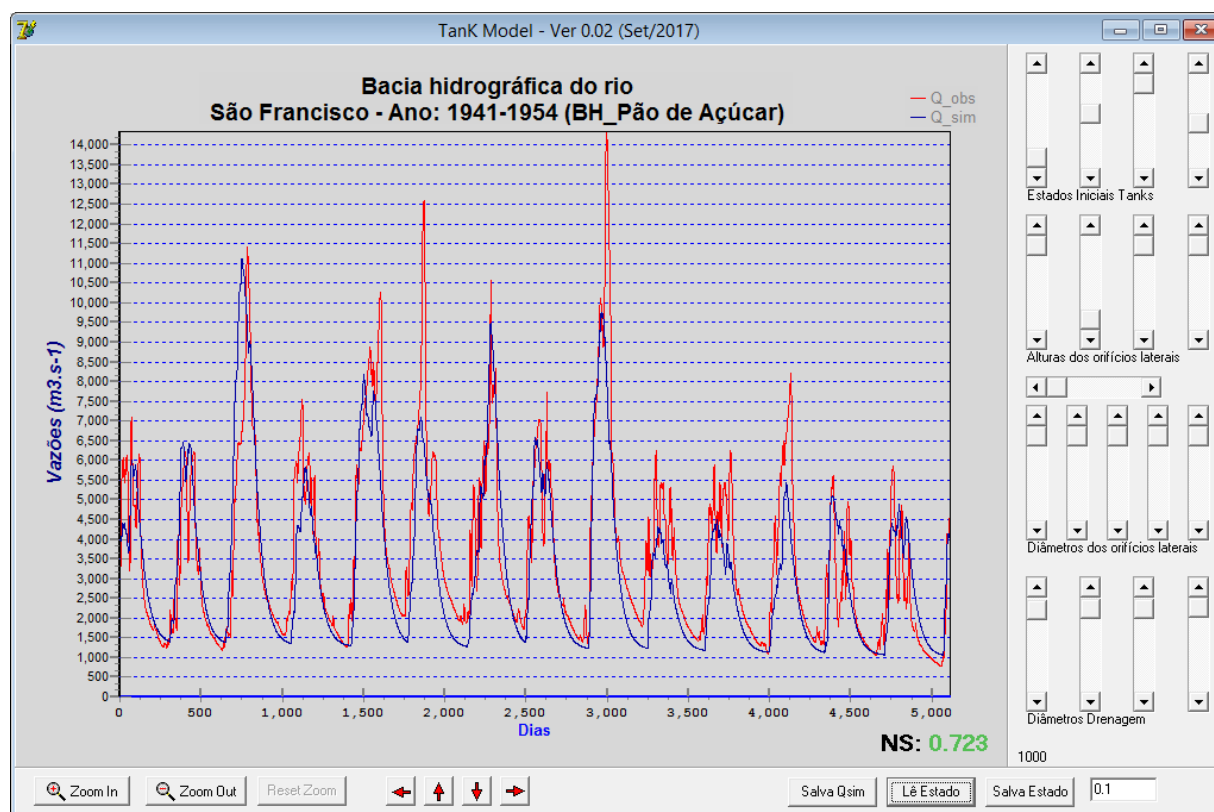
A definição de um orifício de drenagem no tanque quatro, para ajuste de perdas para o aquífero profundo, foi implementada no modelo e é representada pela última dentre as barras de rolagem que são vistas na parte inferior (Diâmetros Drenagem) da Figura 6.2. Esta característica, aliada à possibilidade de se ajustar a sensibilidade de cada parâmetro, individualmente e em tempo real, a partir da barra de rolagem horizontal vista na Figura 6.2, permitem a aceleração da apreensão do comportamento de pequenas e de grandes bacias. Partindo-se de um set de parâmetros harmônicos, propostos pelo próprio criador do modelo Tank, Sugawara (1986), e levando em consideração o conhecimento prévio do modelador sobre a bacia, chega-se a bons valores de calibração e ajuste gráfico com poucos movimentos. Pode-se partir ainda de sets próprios, que podem ser salvos em arquivos com extensão TKM. A ferramenta salva os valores simulados em arquivos com a extensão SIM.

Não foi implementada rotina para importação de dados, de modo que foram compiladas as versões para cada período de interesse: calibração, validação e os de interesse para simulações.

Assim, executa-se a versão de interesse e nela procura-se abrir o respectivo arquivo de extensão TKM que foi ajustado através da versão calibração. Mas na verdade, todas as versões são idênticas em suas funcionalidades o que muda de uma para outra é somente o conjunto de dados internos acerca das variáveis utilizadas pelo modelo.

Um detalhe desta versão do TKM é que ela não repassa a evapotranspiração para os reservatórios subsequentes, retirando-a somente do primeiro reservatório. Contudo foi implementada uma versão do modelo Tank Model em uma planilha de cálculo, que prevê o rateio da evapotranspiração entre todos os reservatórios para fins de verificação do impacto da não implementação do repasse da ETP no TKM.

Figura 6.2 – Ferramenta para calibração manual do modelo Tank Model

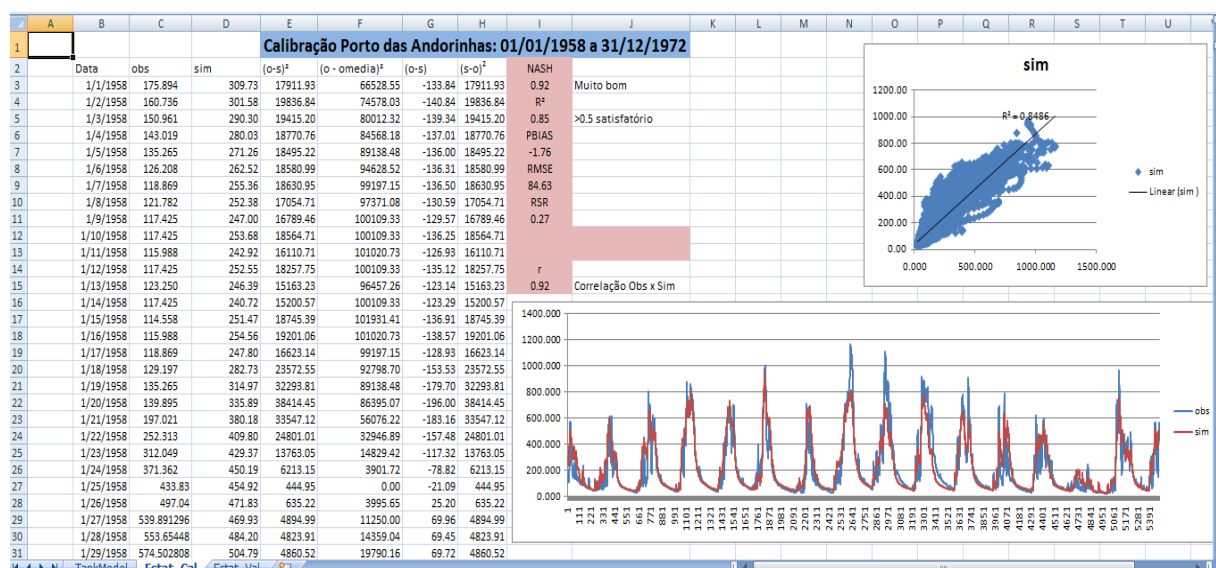


O funcionamento da planilha eletrônica, quanto ao esquema de rateio é o seguinte: determina-se um percentual máximo da ETP que poderá ser retirada de cada um dos tanques. Por exemplo, limite de até 60%(0,6) da ETP para o primeiro reservatório, dos 40% de ETP restante estabelece-se 50% como limite do segundo reservatório, daí que por algum interesse específico se quer 70% como limite para o terceiro reservatório, de modo que restariam 6% a da taxa de ETP para ser resolvido no quarto reservatório. Agora, no caso do tanque não dispor de armazenamento suficiente para cumprir sua parte da evapotranspiração, a diferença é adicionada

ao montante que seria repassado para o reservatório subsequente, o qual (do mesmo modo) irá cumprir sua cota máxima e se ocorrer qualquer diferença, ela é repassada juntamente com a parcela remanescente de cota para a próxima camada. Em relação o fator limite a ser estabelecida para atendimento da ETP pelo quarto reservatório, recomenda-se utilizar a 100%(1), visto que é interessante que para os casos de os reservatórios antecedentes todos estarem vazios e não tenham realizado nenhuma participação na ETP, desta forma ela será totalmente resolvida pelo último reservatório.

O funcionamento ficou muito bom e o resultado quanto aos ajustes de calibração sofreu sensível melhora quando no caso de bacias menores, mas não fora tão grande no caso de bacias mais extensas, a exemplo das totalizações na altura do município de Pão de Açúcar/AL. Figura 6.3. Todas as ferramentas encontram-se disponibilizadas a partir do link apresentado no Capítulo 3 da presente Tese, mas reservam-se os direitos comerciais para o autor quanto à forma de funcionamento da interface visual, mais especificamente do ajuste da sensibilidade dos parâmetros, da ferramenta de calibração TKM. Do mesmo modo para o funcionamento do mecanismo de rateio por cotas, apresentado na planilha de cálculo ETP_Tank Model, a qual deverá ser referenciada em citação, já que é de livre uso para realização de pesquisas com fins acadêmicos ou por órgãos públicos para fins de utilidade pública.

Figura 6.3 – Tank Model de Porto de Andorinhas/MG com apresentação do resultado de Calibração em planilha de cálculo



Obs.: Na planilha constam três abas, na primeira está o modelo Tank Model implementado com distribuição da ETP, na segunda uma gama de estimadores de calibração e gráficos e na terceira é semelhante à segunda, mas utiliza-se de dados de período diferente para realização da validação.

6.3.5. Avaliações dos dados primários e das Simulações

Para que se pudessem fazer avaliações estatísticas adequadas, foram adotadas medidas para tratamento das sazonalidades, "ajustando-as" para a escala de tempo em que a ferramenta de testes produzisse resultados significativos. Por exemplo, caso se precise trabalhar com dados mensais e os dados estejam em formato diário, algumas das ferramentas de testes seriais, disponíveis para o R, podem não tratar isto especificamente, e requererem algum tratamento dos dados diários de modo a obtê-los em média, mediana, máxima ou mínima mensal. Observa-se que para análises cujo interesse seja resultados anuais, existem modos e ferramentas adequadas no ambiente do R (R CORE TEAM, 2015) que já resolvem a sazonalidade mensal sem exigências de pré-tratamento se os dados estiverem nesta escala de tempo.

Deste modo, os dados diários utilizados na calibração, validação e simulações precisaram ser serializados em dados mensais e anuais. Para os dados de precipitação adotou-se a somatória das precipitações diárias em acumulados mensais, formando os arquivos para os testes nesta escala de tempo, e em acumulados anuais porque algumas ferramentas utilizadas não tratavam sazonalidade anual. Quanto aos dados diários de vazões, foram serializados em médias mensais e em médias anuais. Os arquivos com as serializações mensais e anuais dos dados de precipitação e de vazão ficaram assim preparados para os testes de aleatoriedade, independência, autocorrelação, intercorrelação, tendências, mudança de média, confecção de gráficos RAPS, entre outros, que consistiram da AED realizada antes da aplicação de testes de comparação das diferenças.

Para a realização de testes de comparação de diferenças, necessitou-se da formação de grupos de dados, visando estimar singularidades entre eventos de seca e de umidade que possam ter ocorrido nas diferentes épocas representadas por cada grupo em questão. É interessante destacar que as ferramentas de comparação utilizadas, no ambiente R (R CORE TEAM, 2015), identificam os grupos como sendo tratamentos, gerando seus identificadores sob a forma: Grupo 1 = tr1, Grupo 2 = tr2 , ... , Grupo N = trN. Dito isto, pode-se avançar para a formação dos grupos idealizada.

As médias anuais das vazões foram agrupadas em intervalos de 19 anos, ou seja, cada Grupo com 19 valores de médias anuais (poderiam ser mensais, pois os testes resolvem, implicitamente, a sazonalidade). Formaram-se: um grupo de 1931 a 1949 (Grupo 2), outro de 1950 a 1968 (Grupo 3), um outro de 1969 a 1987 (Grupo 4), e, por fim, um de 1988 a 2006

(Grupo 5). Restariam 10 anos, de 2007 a 2016, na série de dados disponível. Como as vazões no decorrer do tempo tornaram-se cada vez mais regularizadas, optou-se por montar um grupo de verificação (branco) com estes dados. Dessa forma, “emprestou-se” 10 anos de dados subsequentemente antecedentes do grupo anterior, ou seja, de 1998 a 2006, formando-se assim o grupo (Grupo 6) com dados de médias compreendidos entre 1998 a 2016. Assim, estes dois últimos grupos apresentam superposição parcial no intervalo de 1998 a 2006 e independência nos intervalos de 1988 a 1997 (Grupo 5) e de 2007 a 2016 (Grupo 6). Eles estiveram assim sujeitos à uma condição forçante de "igualdade", durante a realização dos testes de comparação, servindo para indicar a sensibilidade do teste.

Estes grupos, do 2 ao 6, foram constituídos assim de médias dos dados registrados in loco, pela estação fluviométrica nº 49370000, localizada em Pão de Açúcar/AL. Por outro lado, isto é diferente para o Grupo 1, o qual é constituído por médias anuais das vazões simuladas, compreendidas no período entre 1998 a 2016, pelo modelo Tank Model calibrado e validado. Assim foi planejado para que este dito Grupo 1, representasse as vazões que poderiam estar ocorrendo "naturalmente", ou seja, caso a antropização da bacia estivesse paralisada no tempo, nos moldes dos períodos utilizados para calibração e validação do modelo, entre as décadas de 1940 e 1950. A consideração de que tais vazões seriam as que poderiam estar ocorrendo, deve-se ao fato das características determinísticas do modelo que condiciona suas saídas às variáveis empíricas de entrada. A composição de cada grupo se encontra na Tabela 6.1.

Mas, se observa aqui mais um detalhe importante relativo às chuvas, além do já sabido de que elas se tratam de médias diárias Thiessen dos dados empíricos de um conjunto de estações/dia, trata-se da avaliação prévia realizada sobre os dados, quando dos estudos de correlação para avaliação da possibilidade do preenchimento de falhas pela técnica de regressão. Naquele momento, foi observado que a sazonalidade anual das chuvas era bastante homogênea até a altura do sertão serigipe-alagoano. O que variava eram mais a intensidade e frequência, com tendência de redução no sentido do alto para o baixo São Francisco e de oeste para leste, mas não a distribuição ao longo do ano, assim que a síntese de Thiessen se faz adequada para o caso do recorte que é justamente o de interesse na presente pesquisa.

Mas, consideradas ainda as limitações dos dados de ETP, faz-se necessário a realização de uma gama de testes estatísticos sobre os dados de vazão simulados pelo TKM, a exemplo de um comparativo com o uso do gráfico RAPS, testes de inter-correlação, comparação das tendências, todos em paralelo à realização dos mesmos testes sobre os dados dos acumulados

Thiessen das precipitações na mesma escala de tempo, ou seja, dados mensais contra dados mensais e dados anuais contra dados anuais, para melhor qualificar os valores simulados pelo modelo chuva-vazão, contribuindo para a boa aceitação dos resultados dos testes de comparação aos que ainda serão submetidos.

Em contrapartida, é de se esperar que, sendo estacionários os acumulados de chuva Thiessen, que haja uma identidade entre estacionariedades com aquelas dos valores dos períodos de vazões "naturais" do rio São Francisco (1931 a 1961) e os valores sintéticos, simulados, de modelos determinísticos adequadamente calibrados.

Os grupos de séries de médias anuais formados (Tabela 6.1) serviram de base para a realização dos testes de normalidade de Kolmogorv-Smirnov e de Shapiro-Wilk, visando aferir se a distribuição dos dados atendem aos critérios de normalidade. Os testes de Kruskal-Wallis e de Friedman são *omnibus* para a realização *posthoc* de vários testes de comparação múltiplas entre grupos, a exemplo do de Nemenyi, o qual pode ser realizado sempre que se tiver interesse em explicações sobre a rejeição de H_0 pelo teste *omnibus*, pois permite observar, na comparação entre os pares de grupos testados, a significância das diferenças. O método de Kruskal-Wallis realiza-se através da análise de variância *one-way* sobre os *ranks*, muito útil quando os dados não atendem às premissas para "*one-way* ANOVA" que é *omnibus* para o teste de Tukey. O teste de Friedman se fundamenta numa aplicação da "ANOVA unidirecional" com medidas repetidas que também é chamada de ANOVA com desenho de bloco não replicado (POHLERT, 2016).

Tabela 6.1 - Formação de 19 grupos de vazões médias anuais

Grupo Média	Composição dos Grupos ($m^3.s^{-1}$)																		
tr2 $m^3.s^{-1}$	1931	1932	1933	1934	1935	1936	1937	1938	1939	1940	1941	1942	1943	1944	1945	1946	1947	1948	1949
	4038	2612	2912	2356	3345	2373	3131	2774	2708	3079	3115	3151	4348	3336	5313	4405	4120	3496	5149
tr3 $m^3.s^{-1}$	1950	1951	1952	1953	1954	1955	1956	1957	1958	1959	1960	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968
	3160	2942	3461	2362	2236	2117	2617	4573	2726	2282	3548	2995	2566	2664	2893	3541	3380	2920	3468
tr4 $m^3.s^{-1}$	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987
	2536	3123	1853	2382	2923	3000	2374	1915	1784	1737	4726	4010	3200	3875	3951	2691	3084	3034	1838
tr5 $m^3.s^{-1}$	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	<u>1997</u>	<u>1998</u>	<u>1999</u>	<u>2000</u>	<u>2001</u>	<u>2002</u>	<u>2003</u>	<u>2004</u>	<u>2005</u>	<u>2006</u>
	1757	1567	1818	1949	3839	2529	2247	1787	1685	1794	1948	1760	1950	1427	1571	1553	1879	2066	2097
tr6* $m^3.s^{-1}$	<u>1997</u>	<u>1998</u>	<u>1999</u>	<u>2000</u>	<u>2001</u>	<u>2002</u>	<u>2003</u>	<u>2004</u>	<u>2005</u>	<u>2006</u>	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
	1948	1760	1950	1427	1571	1553	1879	2066	2097	2742	1552	1895	1655	1827	1950	1288	1109	1011	868
tr1** $m^3.s^{-1}$	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
	2227	2710	4185	2618	3550	2900	4489	3548	3202	3133	2873	3780	2654	3578	2848	2209	2625	1876	2759

* - Composto : (1997 a 2006) Grupo 5 + (2008 - 2009) - "observar o destaque em sublinhado"

** - Dados Simulados TKM (Calibrado e Validado para períodos pré-barragens)

O uso de testes não paramétricos é o mais recomendável para os casos não normais, as ferramentas adotadas para realização dos testes *posthoc* oferecem os p-valores (*p-values*) das comparações entre os grupos. A integração destas informações em associação à das demais

metodologias AED torna muito mais segura as avaliações, fortalecendo a argumentação que será apresentada nas discussões do próximo tópico.

Para concluir a apresentação da metodologia, reporta-se agora aos dados de chuva Thiessen, que por possuírem séries mais curtas, com início na década de 1940, se optou por subdividi-los em seis grupos de doze anos. A tabela resultante deste procedimento, com os grupos a serem testados é apresentada na Tabela 6.2.

Tabela 6.2. Grupos utilizados, na comparação de períodos de chuvas

Grupo/ Acumulado	Composição dos Grupos (mm.ano⁻¹)											
tr1 mm.ano ⁻¹	2016 877,7	2015 639,1	2014 671,9	2013 993,5	2012 690,3	2011 1077,9	2010 935,6	2009 1141,8	2008 1060,6	2007 755,8	2006 1014,3	2005 1134,7
tr2 mm.ano ⁻¹	2004 1210,9	2003 791,9	2002 943,7	2001 849,5	2000 1110,4	1999 959,8	1998 847,9	1997 1111,8	1996 879,4	1995 1096,9	1994 943,1	1993 688
tr3 mm.ano ⁻¹	1992 1326,2	1991 987,8	1990 591,3	1989 1072,3	1988 902,4	1987 809,1	1986 918,5	1985 1295,7	1984 713,3	1983 1063,7	1982 705,3	1981 966,1
tr4 mm.ano ⁻¹	1980 1021,6	1979 1129	1978 1104,5	1977 858,5	1976 770,1	1975 814,7	1974 995,9	1973 813,2	1972 976	1971 811	1970 754,8	1969 910,3
tr5 mm.ano ⁻¹	1968 874,9	1967 915	1966 964,7	1965 855,4	1964 1070,5	1963 581,2	1962 1013,2	1961 720,2	1960 1120,2	1959 682,5	1958 820,2	1957 1011,8
tr6 mm.ano ⁻¹	1956 880	1955 859,2	1954 790,1	1953 718,2	1952 966	1951 736,9	1950 853,5	1949 911,7	1948 977,7	1947 1268,9	1946 771,4	1945 1260,8

Até este ponto, objetivou-se realizar estudos comparativos entre grupos de dados de chuva e de vazão, buscando identificar suas relações e características quando num mesmo período. Após, irá ser feita análises a fim de verificar possíveis mudanças nas relações e características entre os pares chuva e vazão nos diferentes períodos. A partir destas avaliações é que se irá poder concluir sobre a intensidade e imanência desta que tem sido referida como o da pior seca dos últimos 100 anos (tr1 - Tabela 6.2).

6.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Sugawara (1995) alegava que não se conseguiria bons resultados de calibração com dados trabalhados pela técnica de Thiessen de modo que nos primórdios da pesquisa ficou-se estabelecida a opção pela sua não utilização e foi investido enorme esforço no estudo das mais diversas formas para se resolver a dificuldade.

Normalmente os elementos estudados pelas geociências são casos de anisotropia o que, no contexto da Geoestatística significa haver direções privilegiadas que condicionam a gênese do fenômeno. Sua constatação é percebida nos semivariogramas quando o alcance ou o patamar, ou ambos, variam conforme a direção. Por outro lado, se os semivariogramas tiverem o mesmo

comportamento para qualquer direção, diz-se tratar de um caso de isotropia. (BERVEGLIERI *et al.*, 2011). Tal conceito tem sido muito frutífero para a geologia e para as ciências dos solos em geral.

No fenômeno das chuvas, a anisotropia pode ser também considerada na media em que se reduza a escala temporal das séries dos acumulados. Assim, acumulados mensais apresentam maior anisotropia que acumulados anuais. Ou seja, existe um dado momento de anisotropia no clima, específico e coerente para cada momento, podendo ser aí espacializado a partir de regressão múltipla, desde que disponha de camadas preditoras. Tal anisotropia muda de um momento para outro, dada as sazonalidades, e por isso perde a coerência se estendida a escala temporal.

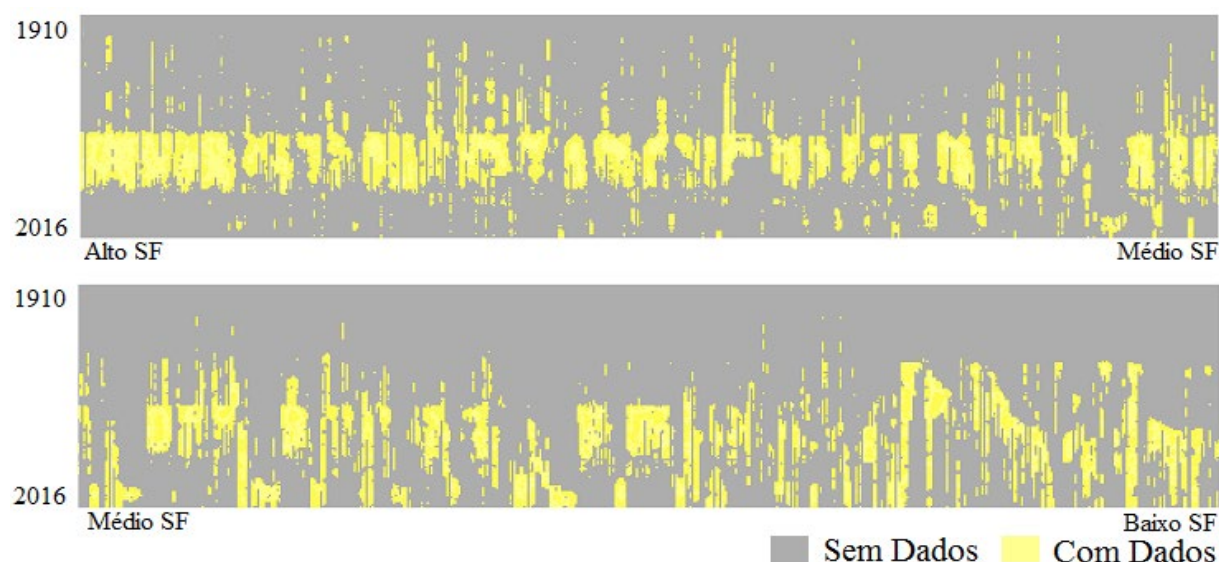
Daí que com o uso de técnicas de regressão multivariada, também se conseguira bons resultados, trabalhando com os acumulados mensais, todavia seu tempo de execução não encaixava com o prazo estabelecido para realização desta pesquisa, visto que seria necessária a confecção e georreferenciamento de todas as camadas preditoras para cada um dos 912 meses. Alguns resultados foram gerados, conseguindo-se encontrar correlação das chuvas com a Longitude e Latitude, principalmente, mas também com a altitude e, em algumas localidades, com a direção do rio, conforme o mês do ano. Outro ponto negativo é que só se poderia chegar ao nível de detalhamento mensal, mas não diário.

Por outro lado, considerando-se os aportes teórico-metodológicos do próprio Sugawara (1995), observou-se que para aquele pesquisador a harmonia era algo importante. Enquanto todos os esforços no sentido de se compor uma média para o dado de chuva para toda a bacia hidrográfica resultavam infrutíferos, não se conseguia deixar de pensar que Sugawara estava falando de um lugar e de uma época onde se poderia contar ainda com a desejada harmonia. Percebeu-se também que o método de Thiessen era o único que conseguia trazer tal harmonia para dados com distribuição espaço-temporal tão precários (Figura 6.2), e de maneira razoavelmente rápida. Para reforçar a qualidade das chuvas na região, foi feito o esforço de se obter os dados de chuva também do entorno da bacia hidrográfica do rio São Francisco, num raio de 50 km em *buffer*.

Na Figura 6.4, são vistas totalizações anuais de dados das estações de chuva (ANA/HIDROWEB) em formato *raster*. Tal formatação permite a visualização da disponibilidade dos dados com o auxílio dos SIGs. Cada coluna representa uma estação que,

estando ordenadas da maior para a menor latitude - do Alto para o Baixo São Francisco, assim podem ser visualizadas no sentido da esquerda para a direita. Da visualização no sentido de cima para baixo cada linha representa um ano, compreendendo o período de 1910 até 2016. Assim, ficam representados os dados das 1155 estações identificadas no interior da bacia, permitindo a visualização das falhas, no espaço e no tempo, por falta de dados, sinalizando a grande dificuldade da formação de um valor único que possa representar este dado, num momento qualquer, a qualquer tempo, a depender do tamanho da área e do período de interesse.

Figura 6.4. Disponibilidade dos dados de precipitação, na bacia do São Francisco entre 1910 a 2016.



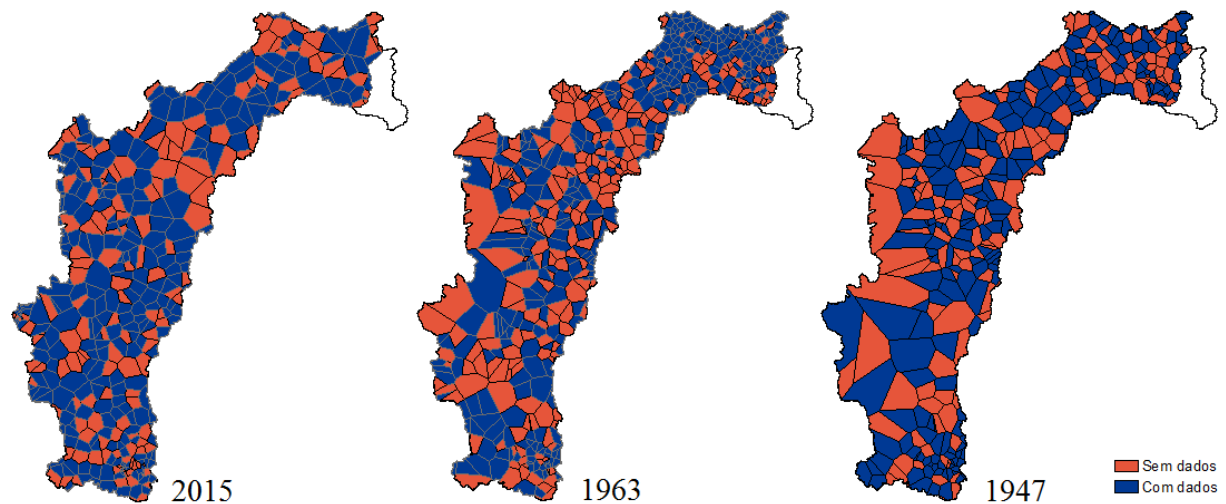
Na Figura 6.5, tem-se outra forma de apresentação da distribuição das falhas e das disponibilidades, com ênfase para o mês de janeiro dos anos 2015, 1963 e 1947.

Mas, retomando-se o exemplo de Sugawara quanto à fragilidade do método de Thiessen, o autor reportava do seguinte modo: Considerando duas estações, A e B, próximas ao divisor de águas de uma bacia, de modo que o fator de área de A é muito pequeno e o de B muito grande, se as duas estações estão localizadas perto uma da outra, os seus pesos deveriam ser quase iguais. O autor exemplifica que, se a estação da posição A é transferida para uma posição B, a situação se inverte, ou seja, o peso de A torna-se muito grande e o de B torna-se muito pequeno.

Por exemplo, por algum fator local em B as precipitações fossem significativamente menores, isto iria forçar os valores para abaixo da média histórica progressivamente, a partir da sua entrada em operação na nova posição. Assim, Sugawara constrói um argumento sólido, visto que o clima não muda em função dos traçados dos polígonos conforme a técnica, mas os fatores de área sim, o que modifica os pesos utilizados na ponderação. Apesar disso, quando o autor se

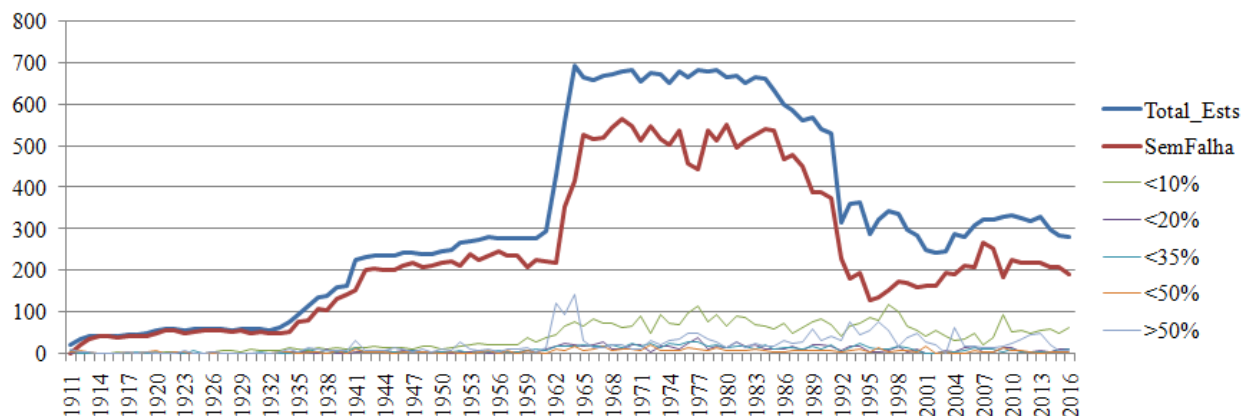
reporta a uma mudança de posição da estação A, como ocorre na prática, a estação A pode parar de registrar devido a diversos fatores cotidianos (quebra de equipamento, perda de funcionários, falta de recursos, desativação) e, num outro, uma nova estação pode vir a ser implantada naquelas imediações de A e de B. De fato, os novos valores dos registros de chuva podem ser diferentes dos das antigas estações e a situação não é diferente do exemplo de Sugawara (1995).

Figura 6.5. Estações com falhas nos dados de chuva no mês de janeiro.



Neste caso, é preciso considerar que, se for pensado em um número tão pequeno de estações, este fato realmente pode desencadear a necessidade de reavaliação da qualidade das simulações dos modelos calibrados preteritamente aos eventos de mudanças de localização das estações. Muito embora, nas grandes bacias com centenas de estações sendo consideradas, o problema perca seu sentido, como será visto mais adiante. Mas antes, é muito importante que se apresente outra visualização da disponibilidade de dados de chuva na bacia hidrográfica do rio São Francisco, desta vez ao longo do tempo somente (Figura 6.6).

Figura 6.6. Distribuição cronológica do número de estações pluviométricas.



Verifica-se a qualidade dos dados disponíveis, a partir da visualização, no gráfico, do nº total de estações disponibilizadas em relação aos quantitativos de estações conforme percentual de falhas nas séries de registros diários. Vê-se que a partir de 1932-1933, dispara o crescimento do número de estações de monitoramento até por volta de 1940, quando se estabiliza já num patamar razoável e com pouca ocorrência de falhas.

Deparando-se com dificuldades no momento da seleção de dados de chuva para estudos de grandes bacias hidrográficas, nos casos onde haja muitas estações de monitoramento, mas apresentando distribuição espacial irregular, onde para algumas áreas resultam grande adensamento, enquanto outras, verdadeiros “vazios de estações”, como na bacia hidrográfica do rio São Francisco, a técnica de Thiessen pode ser bastante útil gerando resultados muito satisfatórios (Figuras 6.7 e 6.8). Isto se dá porque nas situações de adensamento, os fatores Thiessen tornam-se pequenos, eliminando o ruído que ocorre no cálculo da média (23), para maior ou para menor, que advém do grande número de ocorrências com valores muito próximos. Nos casos onde as estações são mais rarefeitas há, ao menos, um equilíbrio já que a técnica de Thiessen trata da proporção equilibrada do espaço entre as estações que ocorrerem, restando apenas, no quesito da representatividade, a ressalva de poucas estações para áreas muito extensas não ser razoável.

Utilizando-se a técnica dos polígonos de Thiessen, percebeu-se atenuação eficaz de três problemas: o de viés, caso se tivessem realizados cálculos de médias simples; também o relativo à própria heterogeneidade da distribuição das chuvas em grandes áreas (pois o método de Thiessen pode ser compreendido como um caso de interpolação discreta) e finalmente - se conduzidos os somatórios, conforme a técnica apresentada – é resolvido também o problema do preenchimento das falhas nos registros por ausência de dados, gerando-se dados consistentes que demonstram grande aplicabilidade.

Das figuras 6.7 e 6.8 podem ser inferidas diferenças mensais importantes a nível geral, visto que cada cor corresponde a um intervalo de precipitação em mm específico. Importante salientar que tal escala cromática para apresentação de classes de volumes precipitados é a mesma utilizada pelo INMET na sua divulgação de informações sobre chuvas. Desta forma, a escala cromática foi pensada de modo a oferecer contrastes adequados facilitando comparações visuais. Pode-se observar que nos meses de fevereiro, março, abril, maio, agosto, setembro e outubro, as chuvas foram maiores no ano de 2015 do que no ano de 1963, enquanto que para os

meses de novembro, dezembro e janeiro, que são meses muito importantes para a produção de água pela bacia, as chuvas foram menores.

Avançando para a análise da figura 6.9., considerando-se o período de 1941 a 2016, onde se observa tendência de aumento dos volumes de chuvas Thiessen, em média, conforme ajustamento do coeficiente angular apresentado na equação. Vê-se então que o coeficiente angular em relação à abscissa tempo é positivo. Contudo, observa-se na mesma figura que a partir do entorno do ano 2000, uma tendência é percebida visualmente, indicando a redução dos acumulados anuais precipitados. Por outro lado, caso os dados utilizados na realização do mesmo procedimento fossem os dados diários, o valor do coeficiente angular seria de 0,000002, sensivelmente menor mas ainda assim positivo. Deste modo, realizaram-se também testes com estatísticas não paramétricas. Tendo sido avaliados os pré-requisitos da aleatoriedade através de seis diferentes ferramentas, onde foi testada a aleatoriedade dos acumulados mensais, consistindo de 12 séries, uma para cada mês, com 76 valores, um para cada ano (1941 a 2016). Os testes de aleatoriedade realizados demonstraram através de p-valores largamente favoráveis, a não rejeição da hipótese nula (H_0).

As exceções ficaram somente em duas das ferramentas, as Bartels, em dois meses somente, abril e julho e a ferramenta de teste de Wallis-Moore, unicamente o mês de setembro. Assim, dos 6 diferentes testes aplicados 3 não rejeitam a ocorrência de aleatoriedade dos dados e os 3 contrários, incidiram apenas pontualmente, sobre três dos doze meses testados. Realizando-se os mesmos testes só que agora em cima da série de acumulados anuais, fora unânime a não rejeição da hipótese H_0 , por conseguinte, é correto se afirmar que as séries Thiessen de acumulados mensais e as de acumulados anuais de precipitação, totalizados para a realização da presente pesquisa, são aleatórias.

Além dos resultados dos testes de aleatoriedade, foi avaliada a homogeneidade entre os seis grupos (Tabela 6.2.) das doze séries de acumulados mensais através dos testes de Kruskal-Wallis e de Friedman, verificando-se se os dados de cada grupo provêm de uma mesma população. A forma de processamento estabelecida pelos testes de Kruskal-Wallis e de Friedman impõe esta redução de 76 para 72 anos, isto é, para que os grupos contassem com mesmo número de amostras (anos). Cada um, dentre os seis grupos estabelecidos para a dada população de acumulados mensais é testado contra os outros 5 da mesma população, verificando-se se suas distribuições são semelhantes. O que, quando confrontado com os resultados dos testes de aleatoriedade, informa sobre a homogeneidade entre as distribuições dos dados dos grupos.

Figura 6.7. Acumulado da precipitação nos meses de janeiro a junho, pela técnica de Thiessen, para a bacia hidrográfica do rio São Francisco.

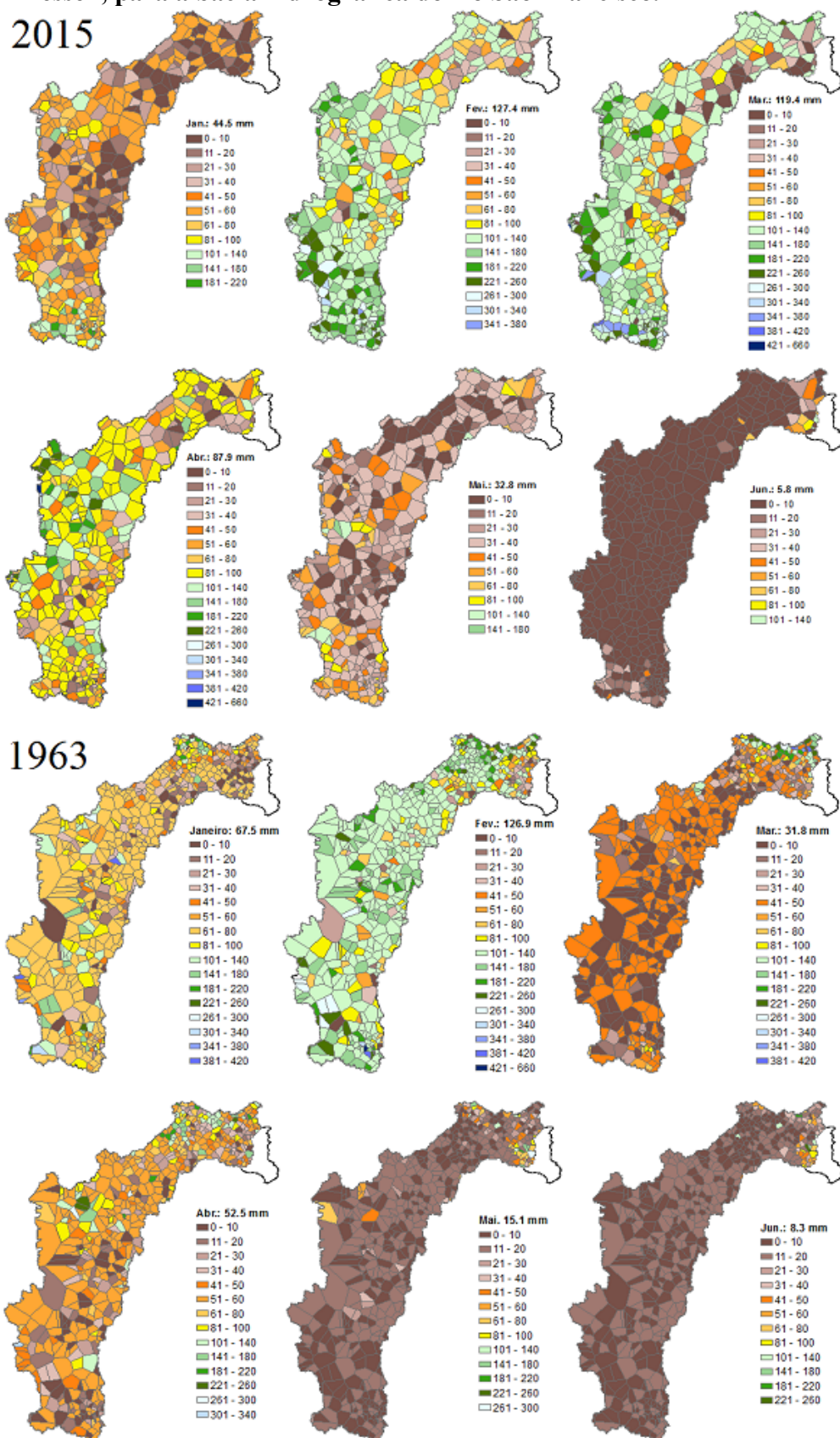


Figura 6.8. Acumulado da precipitação nos meses de julho a dezembro, pela técnica de Thiessen, para a bacia hidrográfica do rio São Francisco.

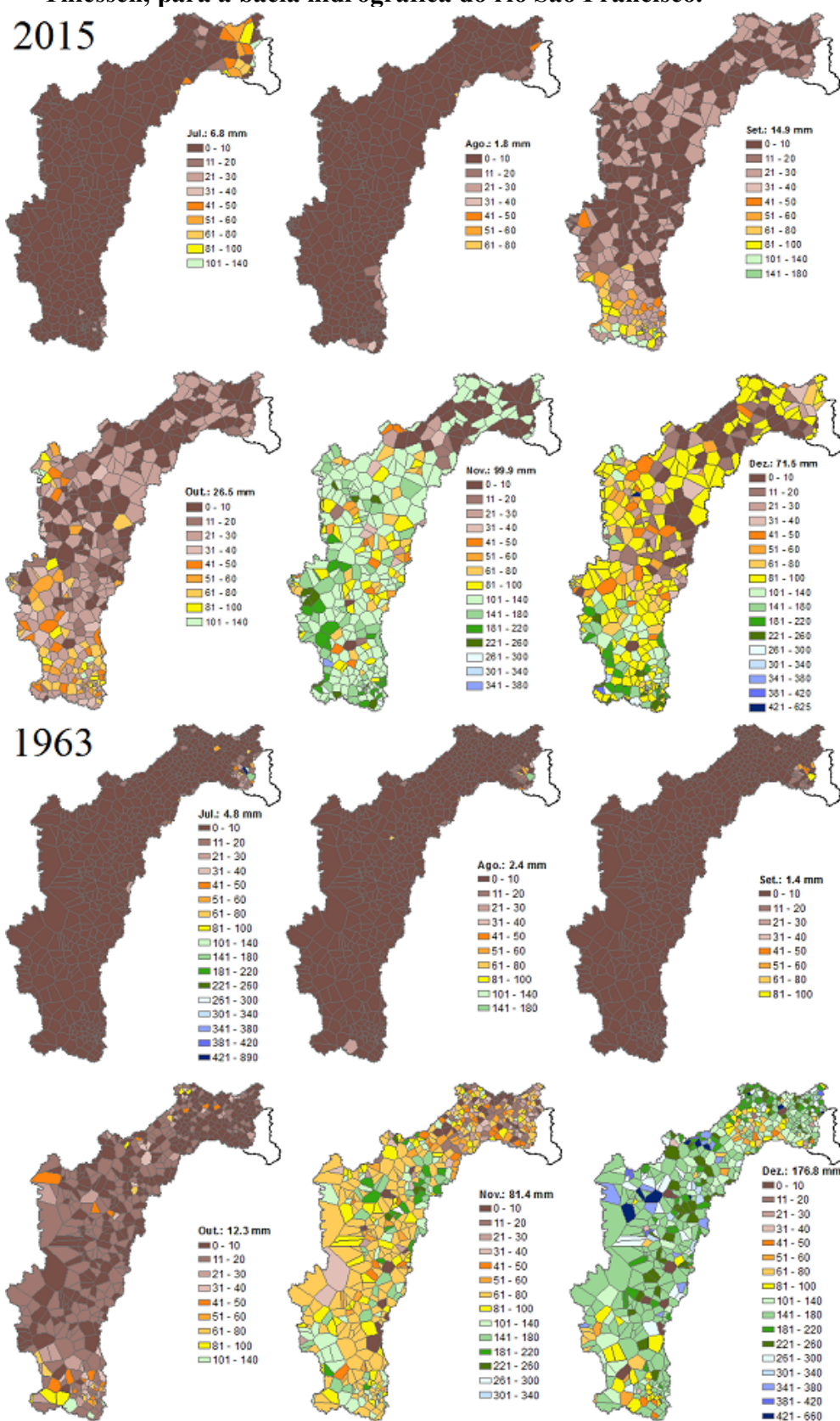
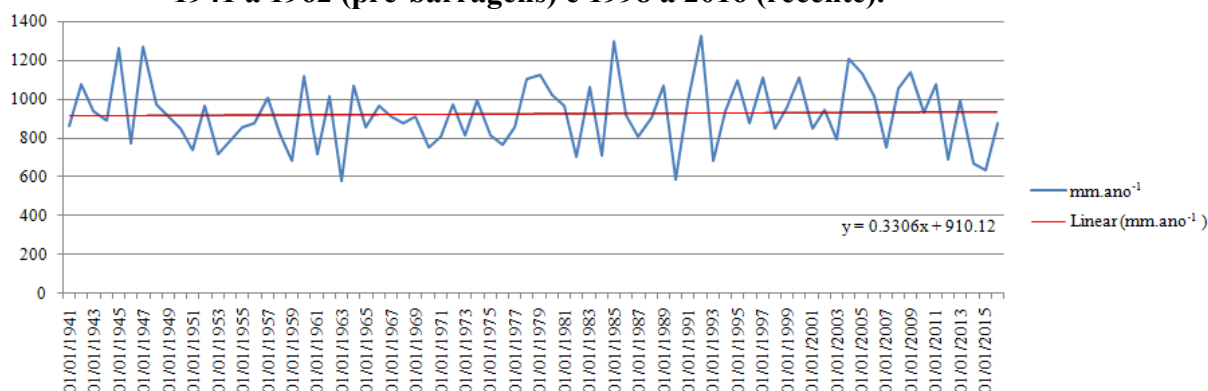


Figura 6.9. Chuvas Thiessen para a bacia hidrográfica do rio São Francisco. Períodos: 1941 a 1962 (pré-barragens) e 1998 a 2016 (recente).



A fim de se identificar a estacionariedade das séries foram realizados diversos tipos de análises, utilizando-se testes estatísticos não paramétricos de tendência, a exemplo do teste parcial de Spearman, onde se avaliou a ocorrência de correlação da covariância. Esse teste é originalmente utilizado para identificar (in)dependência entre (co)variáveis. Na ferramenta utilizada, no ambiente da linguagem de programação R (R CORE TEAM, 2015), a operação pode ser realizada a partir dos coeficientes de correlação obtidos via método de Pearson ou de Spearman, medindo a magnitude da tendência linear/monotônica com o tempo, frente ao impacto da covariância parcial calculada a cada passo. Outros testes utilizados foram o de detecção de ponto de mudança de Pettitt e o de inclinação do Sen. Todos os resultados estão listados na Tabela 6.3.

Observando-se a tabela, percebe-se que nas séries de dados mensais predominam as não rejeições de H_0 , que os meses de estiagem rigorosa na bacia, junho e julho, é que foram exceções onde as hipóteses nulas são rejeitadas. Os testes de Kruskal-Wallis informam que os dados provêm de uma mesma população, ou seja, a distribuição de nenhum dos grupos testados difere dos demais, para cada mês testado. O teste de tendência de Spearman confirma a tendência para os meses junho e julho e registra-se que na reavaliação via teste parcial, manteve-se apenas julho como significativo.

O teste de Pettitt encontrou pontos de mudança da média da população, considerados significativos também para os meses de junho (a partir do ano de 1981) e julho (1990). Das análises gráficas pode-se observar que as séries temporais dos acumulados mensais Thiessen das precipitações dos meses de junho e julho, isoladamente, apresentam tendência negativa nítida, que é reforçada pelo fato da inexistência de valores *outliers* a partir dos pontos de mudança

detectados pelo teste de Pettitt. O teste de Sen também confirma as ocorrências de tendências negativas para os meses de junho e julho.

Tabela 6.3. Resultados das estatísticas de homogeneidade e tendência

Mês	Kruskall -Wallis*	Friedman *	Spearman *	rS**	Pearson *	rP***	Pettitt *	Sen *	sSen ****
Jan	0,5776	0,7729	0,4	0,1	0,26	0,13	0,4445	0,4281	0,3944
Fev	0,7887	0,2667	0,65	-0,05	0,89	-0,02	0,6569	0,7227	-0,108
Mar	0,6443	0,4579	0,59	0,06	0,9	0,01	0,6569	0,603	0,239
Abr	0,4127	0,8358	0,82	-0,03	0,66	-0,05	0,7543	0,8193	-0,054
Mai	0,6897	0,7801	0,32	-0,12	0,27	-0,13	0,532	0,3285	-0,058
Jun	0,0387	0,06782	0,0004	-0,4	0,001	-0,4	0,00459	0,001	-0,109
Jul	0,0027	0,0017	0,00007	-0,45	0,003	-0,3	0,00008	0,0002	-0,072
Ago	0,1179	0,06876	0,05	-0,23	0,6	-0,06	0,1884	0,0705	-0,028
Set	0,2646	0,1341	0,32	0,12	0,38	0,11	0,1884	0,2185	0,069
Out	0,232	0,146	0,99	0,001	0,72	0,04	0,5175	0,8458	-0,039
Nov	0,1132	0,1589	0,91	0,01	0,52	0,08	0,5272	0,8458	-0,039
Dez	0,3305	0,3156	0,86	0,02	0,98	0,003	0,3786	0,8193	0,0989

* p-valores dos testes; ** Coeficientes dos testes de Spearman, pelas covariâncias parciais; *** Coeficientes dos testes de Pearson, dos chi-quadrados parciais; **** Coeficiente da Inclinação de Sen.

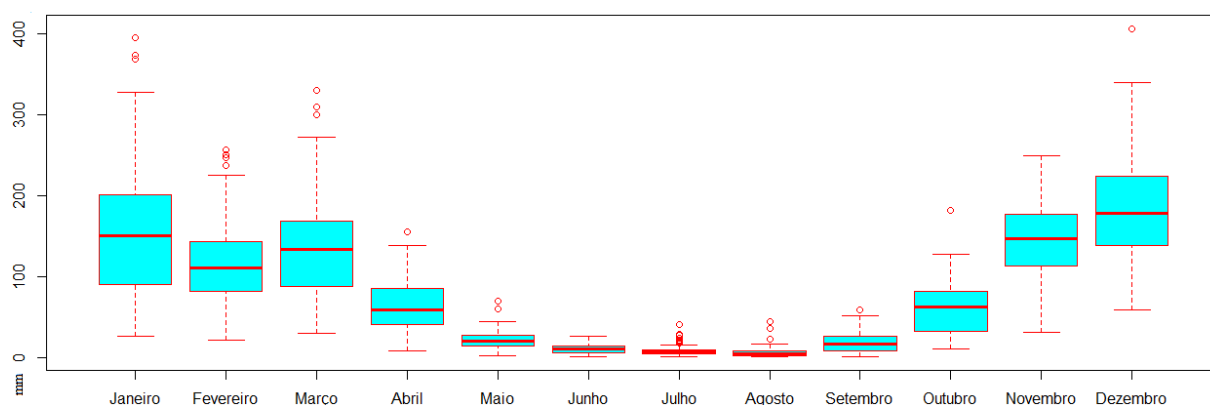
(ps. Em vermelho os p-valores que indicam rejeição de H_0 .)

Após a realização dos testes previstos, percebe-se não haver impeditivo para a realização da presente pesquisa. Cabendo aqui também, ao menos, três considerações: 1), apenas dois meses, junho e julho, foram considerados como passíveis de estarem apresentando tendência. Com isso, restaram outros dez que apresentam ótima qualidade; 2), os dois meses críticos são justamente os meses que registram baixíssimas leituras de chuvas em relação aos demais, mesmo em se considerando seus *outliers* (como se pode observar a partir da Figura 6.10), sendo pequena a sua interferência no conjunto global dos dados; e 3) Ainda existe a série de acumulados anuais de precipitação Thiessen para serem avaliados quanto a sua viabilidade para testes de comparação múltiplas, de grande interesse. E mais, os testes realizados até o momento incidiram sobre os acumulados mensais Thiessen, e que se deram, tão somente pelo cuidado quanto a conferência da qualidade estatística dos mesmos, neste nível de detalhamento temporal, para tornar confortável as análises dos resultados dos resultados quando os mesmos testes forem realizados sobre os grupos de acumulados anuais (formados a partir da mesma série de dados Thiessen diários base que os grupos de acumulados mensais discutidos).

É de extrema importância observar na Tabela 6.3, que os coeficientes dos testes de Spearman, Pearson e de Inclinação Sem (rS, Rp e sSen, respectivamente) indicam a inclinação da tendência como sendo negativas ou positivas, o que deve ser considerado somente quando das rejeições de H_0 pelos aludidos testes. No caso da aceitação da hipótese alternativa (H_A) aumenta-se o grau de importância das incertezas, já que o intervalo de confiança do teste, perfilará

tantos valores contínuos a partir de uma ponto na escala dos números dos positivos, passando-se pelo zero, contiguamente, até outro ponto limite na escala dos negativos, ou seja, no caso de H_A não há como se garantir se a tendência apontada pelos coeficientes rS , R_p e $sSen$ será de fato positiva ou negativa, uma vez que se está excedido o grau de significância de 5%, estabelecido para a realização dos cálculos dos estimadores. É por isso que somente nos casos de rejeição de H_0 , dos testes em questão, é que os coeficientes rS , R_p e $sSen$ tornam-se seguros quanto ao sinal das intensidades de tendência informados, se garantidamente positivo ou se garantidamente negativo.

Figura 6.10. Boxplot dos acumulados mensais de chuvas no período de 1941 a 2016.



Deste modo, tais testes servem para suprir de informações quanto à prevalência de estacionariedade nas séries de acumulados mensais Thiessen da precipitação, quando consideradas mês a mês, além de suas aleatoriedades, independência e homogeneidade, e da concordância entre as distribuições, sazonalidades, entre grupos de meses formados. O tamanho das séries também é uma questão relevante, pois se dispõe somente de 76 anos de dados empíricos, o que é bastante para a realização de muitos tipos de testes. Contudo, para estudos de estacionariedade, considerando-se a possibilidade de ocorrência de sazonalidades de longa duração (seculares) e, quando se atenta para o fato de que a série de dados poderá sofrer subdivisão para a formação de grupos, como no presente estudo onde ocorrem os grupos de 12-19 anos, o que pode "invisibilizar" os fenômenos ambientais de ciclos mais longos. Tais informações são essenciais para que se possa considerar a aplicação de testes estatísticos de comparação e o uso dos produtos simulados por modelos matemáticos, sejam estes determinísticos, sejam estocásticos.

Agora serão apresentados os resultados dos testes estatísticos aplicados sobre a série dos acumulados anuais, Thiessen, compreendidos entre os anos de 1941 a 2016 (ou 1945 a 2016, nos

casos de Kruskal-Wallis e de Friedman). Em relação aos testes de aleatoriedade, não houve rejeição da hipótese nula (a qual afirma que a população testada não difere da aleatoriedade) por nenhum dos testes, o que é significativo visto que foram utilizadas seis ferramentas, abrangendo um conjunto de cinco diferentes métodos, os quais já mencionados. Já pelos testes de Kruskal-Wallis e de Friedman, cujos p-valores excederam 0,99, aceita-se fortemente a hipótese nula de que cada um dentre os seis grupos de dados pertencem a uma mesma população.

Pelos testes de tendência, foram encontrados os seguintes resultados: Teste de Mann-Kendall e de Inclinação Sen, p-valores superiores a 0,58; pelo teste de Pettitt, é aceito que não é significativa a ocorrência de nenhum ponto de mudança de média ($p\text{-valor} > 0,58$); conforme os testes de correlações parciais de Spearman ($p\text{-valor} > 0,57$) e de Pearson ($p\text{-valor} > 0,7$), os dados dos acumulados anuais de precipitações Thiessen não apresentam tendência.

A aceitação das hipóteses nula em 100% dos testes realizados indica aleatoriedade, independência e estacionariedade dos dados adequados para sua utilização tanto nas rotinas de testes estatísticos não paramétricos, quanto para suprir necessidades, como variável de entrada, de modelos hidrológicos.

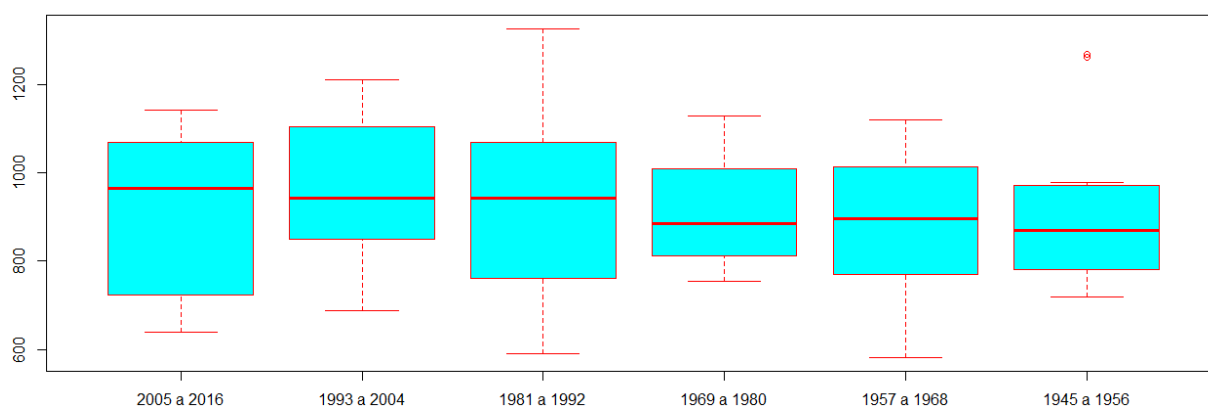
Todos os testes foram realizados para os dados de evapotranspiração obtidos a partir de um modelo SWAT da bacia hidrográfica do rio São Francisco (Capítulo 5 da presente Tese) e que, apesar de sintéticos, foram 100% qualificados a nível de p-valores iguais ou superiores aos atingidos na avaliação dos acumulados anuais de chuvas. Em ambas as séries de acumulados anuais não foram encontrados elementos indicadores da ocorrência de tendências, ao nível de significância de 5%, pelo contrário, aponta-se para forte estacionariedade do período compreendido entre 1941 a 2016.

Finalmente, apresenta-se um gráfico Boxplot de onde podem ser estimadas algumas estatísticas básicas, confiáveis, dos grupos de acumulados anuais de precipitações Thiessen da bacia do rio São Francisco (Figura 6.11). É importante lembrar que as totalizações Thiessen representam somente a porção da bacia hidrográfica das suas regiões de nascentes até a altura da coordenada da estação fluviométrica da ANA, localizada no município de Pão de Açúcar/AL, ou seja, foram calculados somente a partir dos dados das estações pluviométricas contidas no interior desta área, acrescida de um *buffer* de 50 Km, em todo o entorno.

Constata-se que o período de 1957 a 1968 apresentou menor mínima (581mm), menor máxima (1120mm), menor mediana (895mm) e menor 3º quartil (1012mm) que o período 2005 a

2016 (639mm, 1142mm, 965mm e 1065mm), enquanto a única leitura a maior para aquele período fora quanto ao 1º quartil, 795mm contra 740mm. Apenas extraindo e comparando estes valores já se pode verificar algumas diferenças entre os grupos estabelecidos para a realização dos testes, ou seja, ocorreram acumulados anuais de chuvas Thiessen (por período consecutivos de 12 anos) piores que os acumulados anuais Thiessen (consecutivos) do período de crise estudado.

Figura 6.11. Boxplot dos acumulados anuais de chuvas no período de 1945 a 2016.



Para comparar estatisticamente as diferenças entre os grupos, os testes de Kruskal-Wallis e de Friedman, ambos, *omnibus* Nemenyi foram aplicados e não identificaram diferenças ao nível de significância de 5%, para nenhuma das comparações entre pares, em detrimento das constatações feitas a partir da interpretação do *Boxplot* (Figura 6.11). Quanto a isto, pode-se dizer que esta a grande limitação destes testes de comparação, não paramétricos, o fato de não serem tão sensíveis quanto os testes paramétricos, contudo são ferramentas poderosas e seus resultados apenas indicam que se houverem diferenças entre os grupos testados, estas não serão significativamente grandes para o estimador.

Após terem sido apresentados os resultados dos testes estatísticos das séries de dados utilizadas como entradas para o modelo Tank Model, muda-se o foco para a variável de decisão do modelo, ou seja, a vazão. Existe uma dificuldade relativa às vazões registradas pela estação fluviométrica de Pão de Açúcar/AL, que é inerente à regularização dos fluxos do rio São Francisco. A outra fonte de dados é o produto da modelagem estocástica das vazões que são oferecidas pelo poder público como uma restituição das vazões naturais (ONS, 2016). A variável de decisão é importante para a realização da calibração e da validação de modelos matemáticos.

Foram realizados os testes estatísticos para avaliação da qualidade de suas médias anuais de vazão, compreendidas entre 1941 a 2016. Em relação aos dados registrados pela estação

fluviométrica da ANA, nº 49370000, os testes de aleatoriedade apontaram cinco rejeições de H_0 contra um aceite, sendo que este fora através do teste de diferenças de sinais, que apresentou um p-valor de 0,16. Entende-se assim pela não aleatoriedade dos dados empíricos de vazão e o mesmo também se deu para as vazões sintéticas da ONS quando testadas, sendo que estas, de dois aceites encontrados, um se deu a partir do teste de diferenças de sinais (p-valor 0,11) e o outro pelo teste fase-frequência de Wallis-More (p-valor 0,31), as estatísticas dos testes foram elevadas apesar dos p-valores não indicarem a rejeição de H_0 . Assim se deu pela rejeição da aleatoriedade das séries de vazões empíricas e sintéticas (ONS, 2016).

No entanto, subdividindo-se as séries de vazões, o que pode ser feito através da utilização da ferramenta de Pettitt, identificando-se o ponto de mudança da média da população, os testes de aleatoriedade podem assim ser realizados sobre diferentes intervalos de tempo. Como o funcionamento do teste de Pettitt se dá a partir do deslocamento do teste pela população de n elementos da variável testada " X " no instante " t ", como se vê na equação (43), e como se percebe da equação (44) que o método se fundamenta num teste de sinais, o que implica que seu teorema será o de que a soma do número de sinais resultará nulo, se atendido o pressuposto da aleatoriedade. Assim, o teste consegue retornar o ponto do máximo K_T e a partir da equação (43), sua respectiva estatística p conforme a equação (45), a um nível de significância de 5%. Ou seja, se os dados forem aleatórios até certo " t " da série, podem ser aproveitados para a realização de mais testes.

Como Pettitt rejeitou a H_0 (p-valor 0,00000001), sobre a série de 1931 a 2016, identificando o ano de 1986 como ponto de restrição significativa para mudança de média, fez-se um recorte temporal resultando numa população de cinquenta e seis valores de médias anuais de vazão, entre os anos de 1931 a 1986. O período de interesse na avaliação da estacionariedade, para calibração e validação do modelo Tank Model, situa-se entre os anos de 1941 a 1961. Os resultados dos testes estatísticos sobre alguns destes recortes temporais da série original, estão apresentados na Tabela 6.4, onde se pode observar da aceitação da aleatoriedade no intervalo temporal de interesse à modelagem chuva-vazão ajustada para o período pré-regularização das vazões do rio São Francisco, ou seja, entre os anos de 1941 a 1961.

Em seguida foram realizados testes de correlação parcial da covariância de Spearman (p-valor 0,066), e de correlação parcial via método de Pearson (p-valor 0,06142). Apesar dos p-valores ainda dentro da faixa de não rejeição de H_0 , os resultados das estatísticas foram elevados, menores que -0,4. Isto faz, segundo Moreira e Naghettini (2016) e também Voguel *et al.* (2013),

com que o risco de um erro, ao não se rejeitar H_0 quando ela é realmente falsa, traga sérias consequências futuras para a gestão de recursos hídricos. Além destes dois testes os demais resultados para análise de tendências foram: Parcial Mann-Kendall, p-valor 0,084 e S -57,1 (muito crítico). Tendência de Cox-Stuart, p-valor 0,13 e z muito crítico; Inclinação de Sen, p-valor 0,085 e inclinação -63,8 (muito crítico).

Tabela 6.4. Resultados das estatísticas de aleatoriedade das variáveis de decisão

Ferramenta de teste	Dados Estação da ANA, nº 49370000			Dados ONS (2016)	
	1931 a 2016	1931 a 1985	1941 a 1961	1941 a 2015	1941 a 1961
Dif. Sinais	0,193646	0,35454	0,139649	0,167064	0,139649
Runs	1,67E-05	0,214945	0,484423	0,007446	0,255277
Wolfowitz	1,15E-07	0,011433	0,124097	3,23E-05	0,199654
Bartels	5,10E-13	0,004796	0,051845	1,51E-05	0,088065
Bartels_Rank	4,20E-10	0,010865	0,102639	6,84E-05	0,170709
Wallis-Moore	0,009742	0,15877	0,527594	0,358694	0,527594

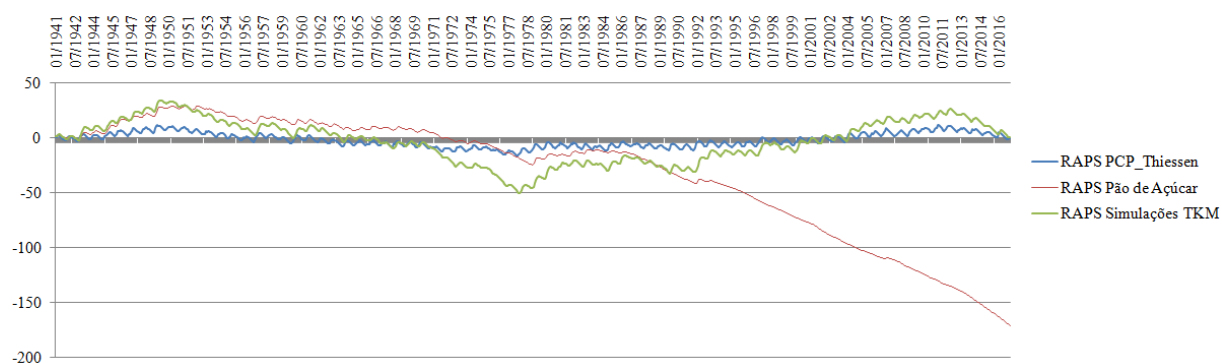
Deste modo, pode-se afirmar que apesar de satisfatórias a estacionariedade e a aleatoriedade, a série testada apresenta fortes indícios para tendências negativas pronunciadas, em sua série temporal de médias de vazões anuais compreendidas entre 1941 a 1961. Mas os dados são passíveis de utilização para os fins da calibração e validação de modelos hidrológicos determinísticos. Outro detalhe importantíssimo é que a vazão, apesar de ser uma variável fortemente dependente da ocorrência de chuvas, é controlada pelas reservas no solo e subterrâneas quando na ausência de algum escoamento superficial das chuvas e esta relação é que a torna mais demonstrativa das tendências para os estimadores, pois na ausência de chuvas por anos seguidos, as suas reservas nos corpos dos solos e sub-solo vão diminuindo.

Numa outra vertente de análise, visando demonstrar tais observações, foi confeccionado um gráfico RAPS, contrapondo-se as projeções relativas às precipitações Thiessen anuais àquelas das vazões. Um detalhe para a confecção do gráfico foi a adoção da média entre os dados anuais de vazão, somente até o ano de 1986, dada a restrição encontrada pelo estimador de Pettitt, esta estratégia tornou a visualização muito informativa e rica, conforme Figura 6.12.

Na Figura 6.12, pode ser visualizada, a partir do traçado gráfico do RAPS para os acumulados mensais das precipitações Thiessen, a sazonalidade anual (o formato serrilhado formado entre a passagem de um ano para o seguinte). Visualiza-se, ainda em relação às chuvas, um ciclo de longo termo entre os anos de 1950-1951 a 2011-2012, que são os ápices e cobrem um período aproximado de 60 anos. O vale deste ciclo é visto no entorno do ano de 1976-1977.

Estas três rupturas, como também outras, foram encontradas através da realização "de parciais" do teste de Pettitt, contudo a visualização do gráfico RAPS é muito informativa.

Figura 6.12. Gráfico RAPS para o período de 1941 a 2016.



A distribuição dos acumulados mensais Thiessen das chuvas, no formato RAPS, variam de modo regular e homogêneo, formando "um serrilhado". Vê-se no RAPS das vazões empíricas que a sazonalidade anual irá desaparecendo a partir de 1974-1975, provavelmente indicando o início do enchimento do reservatório de Sobradinho. Depois se volta a observar a sazonalidade anual até por volta do ano de 1985-1986, quando a mesma desaparece agora definitivamente ao longo do restante da série, o que encaixa com o provável início do enchimento do reservatório de Luiz Gonzaga (1988).

O gráfico RAPS apresentado na Figura 6.12., além de demonstrar a perda da estacionariedade dos dados empíricos de vazão, demonstra a perda da sazonalidade anual e o ganho de forte tendência negativa das vazões a partir dos adventos da regularização. Ele ainda antecipa informações sobre as vazões simuladas pelo modelo TKM, que foi calibrado e validado para a realização do presente estudo.

Por exemplo, vê-se na relação entre as vazões médias mensais TKM e os acumulados mensais Thiessen, que nos períodos de ascensão e declínio das chuvas, os estimadores RAPS apresentam inclinações de mesmo sinal, porém sempre com ângulo de inclinação mais fortemente negativo ou positivo para o RAPS da vazão, o que representa os tempos de resposta de carga e recarga subterrâneas da bacia. Esta é uma informação valiosíssima para que se possa fazer uma gestão de outorgas adequada e ambientalmente responsável. Mas ainda não chegamos às discussões das simulações realizadas com o Tank Model e, por hora, pede-se para que seja observado o comportamento RAPS das médias mensais das vazões empíricas registradas pela estação fluviométrica da ANA, nº 49370000.

Para a obtenção do resultado observado na plotagem do RAPS da vazão empírica, foi importante estabelecer como média da população amostral da série, uma média parcial, visto que as médias de vazão natural do rio sofreram progressiva regularização, o que implicou no seu comprometimento para fins de cálculos com estimadores estatísticos. Foram testadas médias, utilizando-se várias sequências contíguas de dados de médias mensais de vazões ocorridas até o ano de 1986 (entre 1931 a 1961, entre 1941 a 1961, 1931 a 1986 e 1941 a 1986). O ano de 1986, revelado pelo teste de Pettitt é especial, pois este é o limite mínimo da ocorrência de intercepção entre os RAPS chuvas Thiessen e RAPS vazões em Pão de Açúcar/AL e que somente ocorre com a média base das vazões sendo calculada com os dados compreendidos entre 1931 a 1961, ou seja, da totalidade disponível de dados anteriores à regularização.

Estendendo-se a série para cálculo da média base, demandada pelo RAPS, para além do ano de 1986, ela irá diminuindo de valor progressivamente, não importando o grupamento de anos sequenciais escolhidos, desde que em número suficiente para a formação de uma média representativa, visto que as vazões empíricas regularizadas vêm apresentando diminuição. Nos casos em questão, onde as médias bases vão se tornando menores, o RAPS vazões Pão de Açúcar/AL afastar-se-ão, até não mais interceptar o RAPS das chuvas Thiessen, por exemplo, quando a média do RAPS é obtida a partir da série entre 1931 a 1986 a intercepção se dará em 1996, se obtida a partir da série entre 1961 a 1986, o intercepto ocorrerá no ano de 2008 e, caso se utilizem valores na constituição da série para o cálculo da média para além do ano de 1986, aí o traçado do RAPS Pão de Açúcar/AL irá erguer-se pelo quadrante positivo livremente, sem interceptar nem mesmo o eixo das abscissas, indo encerrar-se numa projeção cada vez mais e mais alta, na escala da ordenada, o que pode ser considerado uma distorção.

O gráfico RAPS das vazões, somente se apresenta neste mínimo que está plotado com o uso da totalidade da amostra livre da interferência dos adventos de regularização. Deste modo, percebe-se que aquele ponto de ruptura encontrado pelo teste de Pettitt, é possivelmente o ponto a partir do qual se observa o início de uma correlação negativa entre as vazões registradas e os volumes precipitados na bacia hidrográfica do rio São Francisco.

Como se pôde observar, o RAPS é uma poderosa ferramenta para avaliação de dados, sejam empíricos ou simulados, conseguindo evidenciar facilmente sazonalidades de curto e de longo termo, mudanças abruptas nas séries de dados, homogeneidade, tendência e muitas outras informações de grande utilidade na avaliação de séries temporais de dados. Como último exemplo, basta observar que o RAPS dos dados Thiessen de chuvas, identifica uma mudança de

comportamento na série, que assume tendência negativa a partir do ano de 2011-2012, ora isto coincide precisamente com o início da crise hídrica registrada no rio São Francisco no mesmo período será analisado mais adiante. Por hora, basta-se registrar que os testes apontaram para uma não significância de tendências nos volumes das chuvas e uma significativa e negativa tendência na realização das vazões.

Dando continuidade, passa-se agora para a apresentação dos resultados da calibração (NSE de 0.72) e validação (NSE de 0.68). Os valores simulados apresentaram ajuste gráfico sem vestígio observável de tendência e médias próximas às mensuradas. Os acumulados anuais das vazões simuladas foram submetidos aos mesmos testes de aleatoriedade, independência, homogeneidade e tendência, com 100% de aceitação da H_0 para todos os testes, sempre com margens bastante altas em relação ao nível de rejeição.

A simulação gerada pelo modelo TKM calibrada e validada, foi então considerada para o período de 1950 a 2015, deixando-se o período de 1941 a 1949 à parte, tendo sido considerado como aquecimento. Num teste de correlação entre estes seus valores diários e aqueles respectivos da série disponibilizada pelo ONS (2016), apresentou um coeficiente de Nash Sutcliffe de 0,63. As médias gerais para o período foram $2573,79 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ para a série do TKM e de $2585,78$ para a série da ONS, o que é confirmado pelo ajuste do PBIAS que foi de (-3,13), ou seja, informa que a série do TKM produziu um pouco menos de água.

Aproveitando, verificou-se os mesmos estimadores só que agora considerando a comparação entre os dados empíricos diários da estação da ANA, nº 49370000, em Pão de Açúcar/AL (período acrescido de mais um ano, o de 2016, já que o mesmo se encontrava disponível para ambas as séries), num total de 67 anos de dados diários. Os resultados foram insatisfatórios, com um ajuste NSE de -0,22 e médias de $2573,8 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ (TKM) e $2459.7 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ (Estação da ANA), um diferença de 5%.

Um último teste foi realizado para verificar a estacionariedade do modelo Tank Model calibrado e validado que consistiu no seguinte: aproveitando-se toda a série de dados disponíveis (variáveis de entrada do modelo Tank Model) que compreende 76 anos de dados diários (1941 a 1976), realizou-se uma composição que totalizara 152 anos de dados, através da concatenação da série consigo mesma ao final de seu último registro, ou seja, duplicando-a por justaposição, mantendo-se suas ordens naturais em cada parte. O teste consistiu em simular as vazões diárias para os 152 anos de dados justapostos, para posteriormente poder comparar uma metade da série

simulada, contra a outra metade simulada continuamente. O resultado foi um NSE de 0,996 e um PBIAS -3,49, ou seja, uma tendência negativa imperceptível ao nível de significância dos resultados dos testes não paramétricos, como também graficamente. Assim, o PBIAS expressa bastante bem o interesse, mantido pelo pesquisador, na proposição de calibração que não inflacionasse as saídas a longo termo, mas que se mantivesse, na população sintética criada, a aleatoriedade e estacionariedade concordantes com as da variável independente, a chuva.

O elevadíssimo NSE obtido nas simulações a partir das séries justapostas, compondo uma simulação continua de escala de tempo secular, é bastante razoável como prova da estacionariedade conseguida com a calibração. Considerando-se que as variáveis de estado (alturas dos reservatórios do modelo Tank Model) já vinham no processo de aquecimento, o grau do determinismo do modelo se dá justamente pelo fato de ao receber valores idênticos como entrada, 76 anos após, conseguir gerar saídas praticamente idênticas. Na Tabela 6.5 são apresentados os valores para cada parâmetro da calibração do modelo Tank Model da bacia hidrográfica do rio São Francisco.

Tabela 6.5. Ajuste dos parâmetros do Tank Model para a bacia do rio São Francisco

Par	Valor	Par	Valor	Par	Valor	Par	Valor
X_1	51,8	h_1	0	a_1	0,001645	b_1	0,03069
X_2	50	h_2	50	a_2	0,000269	b_2	0,02234
X_3	0	h_3	0	a_3	0,00398	b_3	0,0217
X_4	5303,7	h_4	0.4	a_4	0,00519	b_4	0,000122
				a_5	0,0000352		

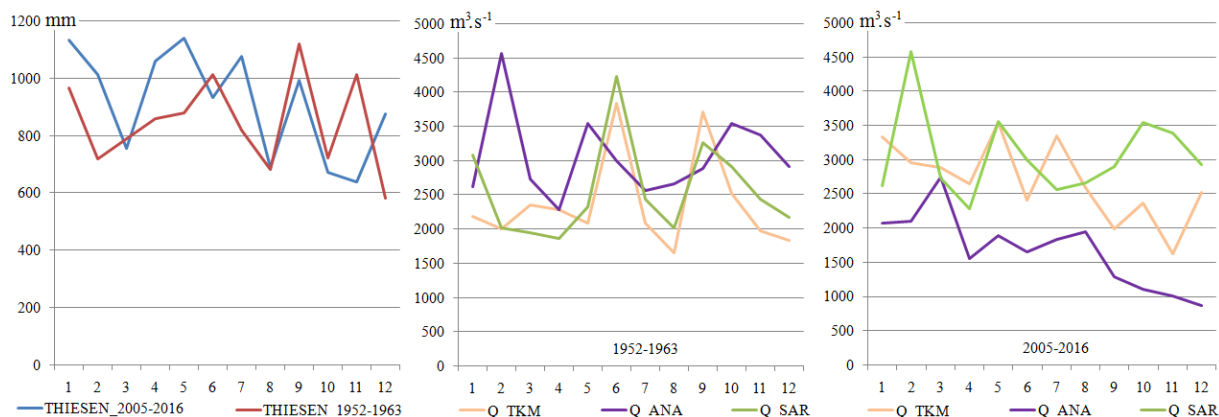
Nota: Conforme indicações na Figura 3.13. no Capítulo 3 da presente Tese.

Retomando-se agora a discussão de que os testes de comparação de médias *posthoc* de Nemenyi não detectaram diferenças entre os grupos de acumulados anuais de precipitações Thiessen, ao nível de significância de 5%, quando elas eram perceptíveis a nível das estatísticas mais elementares e de gráficos do tipo Boxplot. Tal detalhe, aliado à constatação da não normalidade dos dados dos acumulados anuais das vazões TKM dos grupos 1 e 2, a partir do teste de Shapiro-Wilk, o que é limitante para a aplicação de testes de comparação múltipla paramétricos, como a exemplo do de Tukey, já que justamente o grupo 1 (vazões representativas da crise hídrica recente) acusou forte não normalidade.

Isto faz com que a análise de se seriam as reduções das chuvas o agente causal das reduções das vazões do rio São Francisco a um nível tão baixo, invariável e duradouro ao longo dos últimos cinco anos se torne um desafio. Porque a sensibilidade dos testes não paramétricos é

um pouco menor de modo que as diferenças podem não ser tão pronunciadas, ao nível de significância dos testes. Prosseguindo, apresenta-se na Figura 6.13 uma análise, através de gráficos lineares, das relações entre chuva e vazão em dois momentos distintos de crises hídricas, 2005 a 2016 e 1952 a 1953, por apresentarem durações e intensidades aproximadas.

Figura 6.13. Gráficos das relações chuva-vazão em dois períodos distintos de crise hídrica.

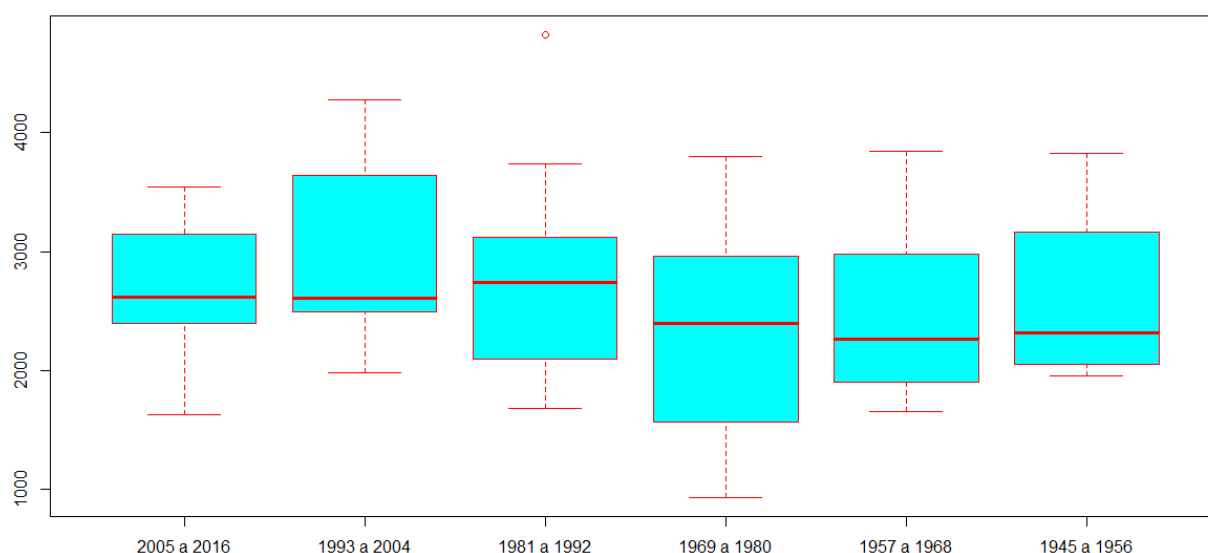


O que se pode observar na Figura 6.13 é que chuvas de alturas e tendências "similares", Thiessen 2005-2016 e 1952-1963, produziram vazões, TKM e Q_ANA, "similares" no período de 1952-1963 e que o mesmo não ocorreu no período de 2005-2016, onde se observa uma grande diminuição das vazões Q_ANA. Em relação às chuvas a média dos acumulados anuais Thiessen registrados entre 2005 a 2016 são ligeiramente maiores, totalizando 916,1 mm, enquanto para o período de 1952 a 1963 foram encontrados 843,9. Por outro lado, a média anual das vazões empíricas registradas no período de 1952 a 1963 foi de $3058,8 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, já no período em estudo (2006 à 2016) o valor da média anual das vazões empíricas foi de $1671,6 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. O TKM produziu $2686,7 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ em termos de média anual para o período de 2006 à 2016 e $2382,5 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, que são mais concordantes com as chuvas, em termos das suas diferenças entre os períodos, ao contrário das vazões empíricas de registro.

Na Figura 6.14. é apresentado um gráfico do tipo Boxplot produzido a partir das médias anuais dos dados simulados TKM onde se pode observar que a menor máxima dentre as médias anuais das vazões TKM realizadas se encontra na amostra do grupo 1, entre 2005 e 2016, contudo a menor mínima deste grupo (ano de 2015 - $1626 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$) somente foi menor dentre todas as mínimas de ocorrência na população de dados a uma outra encontrada no grupo 4 (1969 a 1980), que é referente ao ano de 1976 ($933,5 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$) que, em concordância com o gráfico RAPS apresentado, representa o extremo mínimo do vale do ciclo de longa duração da variação das chuvas identificado.

Isto serve para demonstrar, mais uma vez que a atual crise não se trata da pior já registrada quando consideradas as relações chuva-vazão a partir das vazões livres da interferência da regularização através das grandes barragens. A análise Boxplot foi realizada ainda a partir das séries sintéticas da ONS (ONS, 2016), contudo além de a mesma ter indicativo de rejeição tanto de aleatoriedade quanto de estacionariedade, mostrou-se inadequada pela análise do seu comportamento RAPS e no pelo teste de Pettitt apresentou forte rejeição da hipótese H_0 .

Figura 6.14. Boxplot das médias anuais de vazões no período de 1945 a 2016.

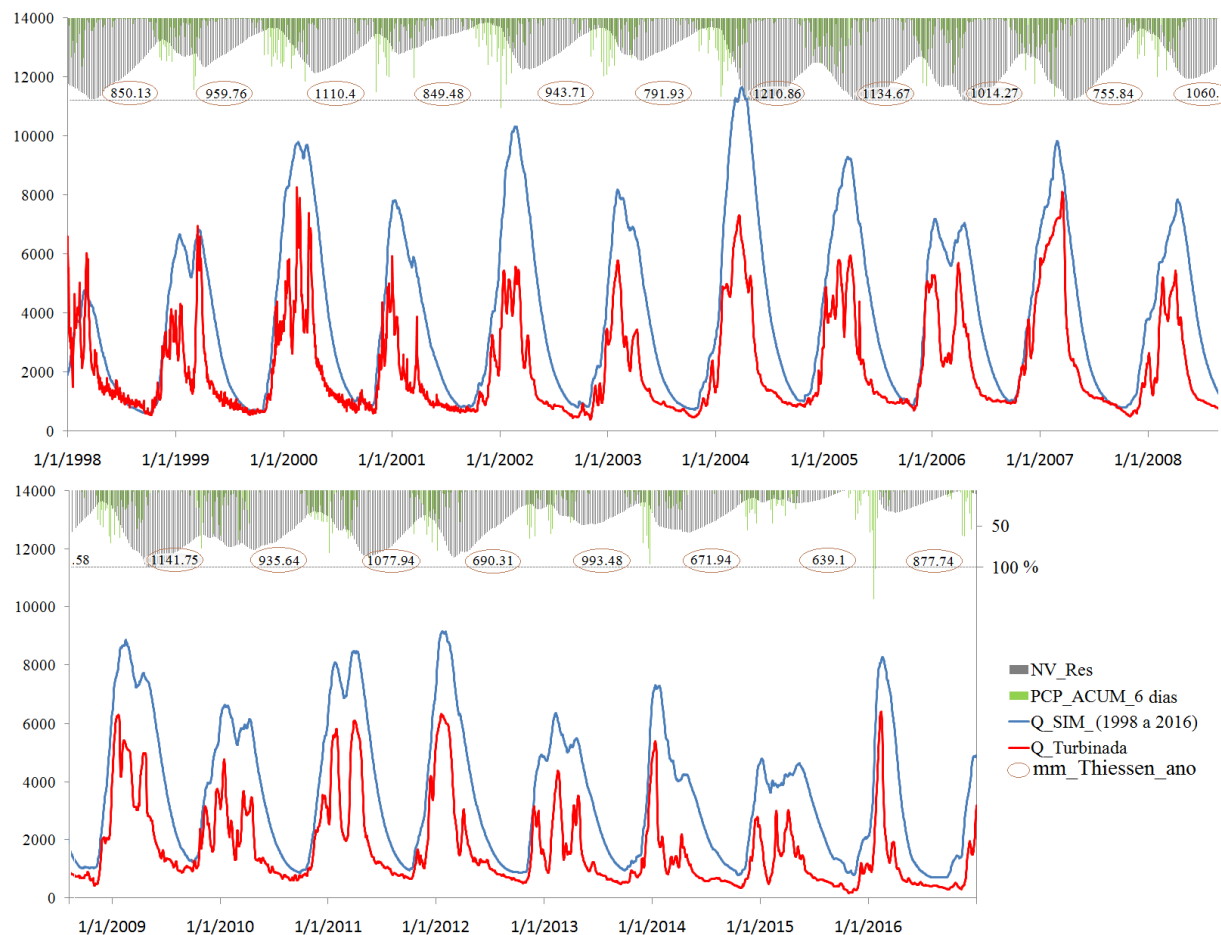


Tais resultados evidenciam então as interessantes características dos adventos de secas que assolam o rio São Francisco. Na Figura 6.15 são apresentados, nas partes superiores e circulos na cor laranja, os valores dos acumulados de chuvas Thiessen anuais, em mm. Próximo a estes, na cor verde, os acumulados de seis dias de chuvas que se intercalam com barras na cor cinza que são indicativas do nível de enchimento do reservatório de sobradinho. Pode ser observado que do ano de 2012 até 2016, apresentam fortes variações na distribuição e com volumes perceptivelmente menores. O acumulado anual de chuva de 2015 foi o segundo pior (639.1mm) de todo o período em estudo, só perdendo para o acumulado anual de 1963 que foi de 581.21mm.

Diante de todo o resultado apresentado, com certa razoabilidade pode-se admitir que os acumulados mensais Thiessen dos registros pluviométricos da bacia hidrográfica do rio São Francisco apresentam evidências de que vêm ocorrendo mudanças nos eventos de chuvas

recentes na região, mas que não explicam satisfatoriamente a crise hídrica vigente no Baixo São Francisco.

Figura 6.15. Turbinamento de Sobradinho diante da situação de crise.

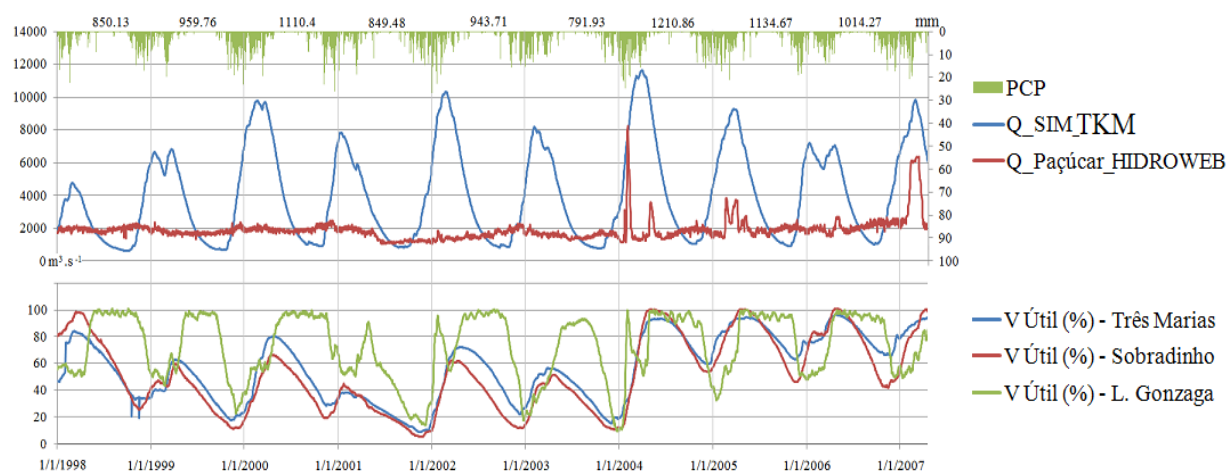


Havendo ainda que se considerar, conforme Piasentin (2011), que Três Marias foi pensada para poder atender finalidades múltiplas como a regularização das vazões, melhoria da navegação, aumento na disponibilidade de água para a agricultura, consumo humano e também para geração de energia elétrica. Os reservatórios de Sobradinho e de Luiz Gonzaga, muito maiores, foram pensados com o mesmo intuito. Porém, a contradição é a de que investimentos vultosos como estes, não estão sendo eficientes para realizar a principal missão a que foram destinados. Isto nos faz levantar questões de como ou por que isto está acontecendo.

Observa-se que o sistema de gerenciamento da água do reservatório, não leva em conta o seu nível de enchimento e nem as reservas de água dos solos e subterrâneas da bacia hidrográfica do rio São Francisco. Vê-se que o aumento do turbinamento se inicia a partir da segunda quinzena do mês de outubro de um ano, podendo atingir picos de máximas a qualquer tempo ou permanecendo assim até a segunda quinzena de abril do ano seguinte, quando é iniciada a rotina

de redução do turbinamento. Isto se reflete no seu gráfico, que é praticamente um espelho do da precipitação com uma pequena latência. O que também pode ser visto é que justamente neste período, considerado como de "safra" do setor hidrelétrico, tenham ocorrido fortes reduções dos volumes e distribuição das chuvas. Uma análise mais abrangente, contendo os níveis dos três reservatórios utilizados na regularização das vazões do rio São Francisco pode ser vista nas Figuras 6.16 e 6.17.

Figura 6.16. Manutenção do enchimento do reservatório Luiz Gonzaga no período de 1998 a 2007.



Na Figura 6.16, vê-se uma linha com dados numéricos acima dos gráficos. Tratam-se dos valores das alturas anuais das precipitações Thiessen acumuladas. Abaixo vêm os traçados das vazões simuladas pelo TKM e medidas na estação Pão de Açúcar/AL (46998000) e mais abaixo, os traçados dos níveis de enchimentos dos três reservatórios de regulação das vazões do rio São Francisco. Neste gráfico composto, pode ser visualizado que dos dois períodos de redução das chuvas encontrados, 2001 e 2003, mesmo sendo diminuídos os armazenamentos dos reservatórios de Três Marias e de Sobradinho, busca-se a manutenção, aparentemente prioritária, dos níveis mais elevados do reservatório Luiz Gonzaga. E este é o maior indicador de gravidade da seca que se deve considerar, pois o referido reservatório encontra-se mais próximo das hidrelétricas, a fio d'água, de Paulo Afonso IV e de Xingó, as mais relevantes na geração do complexo hidrelétrico do rio São Francisco.

Através da Figura 6.17, que representa um gráfico do mesmo tipo que o apresentado na Figura 6.16, diferenciando-se somente quanto ao período considerado que é de 2008 a 2016. Constata-se que nos anos anteriores mesmo quando nas ocorrências de chuvas anuais menores, a praxe é ir esvaziando o reservatório de Sobradinho, de modo a se manter por mais tempo possível o reservatório de Luiz Gonzaga cheio, para se ter pronto atendimento na geração de energia. Mas

este sistema é ainda mais complexo, pois na verdade o Sistema Elétrico Nacional é interligado (SIN) no qual há o papel da ONS que tem tomar decisões levando em consideração todos os eventos ocorrendo em todas as bacias hidrográficas e demais componentes da matriz energética do país, de forma a garantir a constante oferta dos volumes de energia necessários.

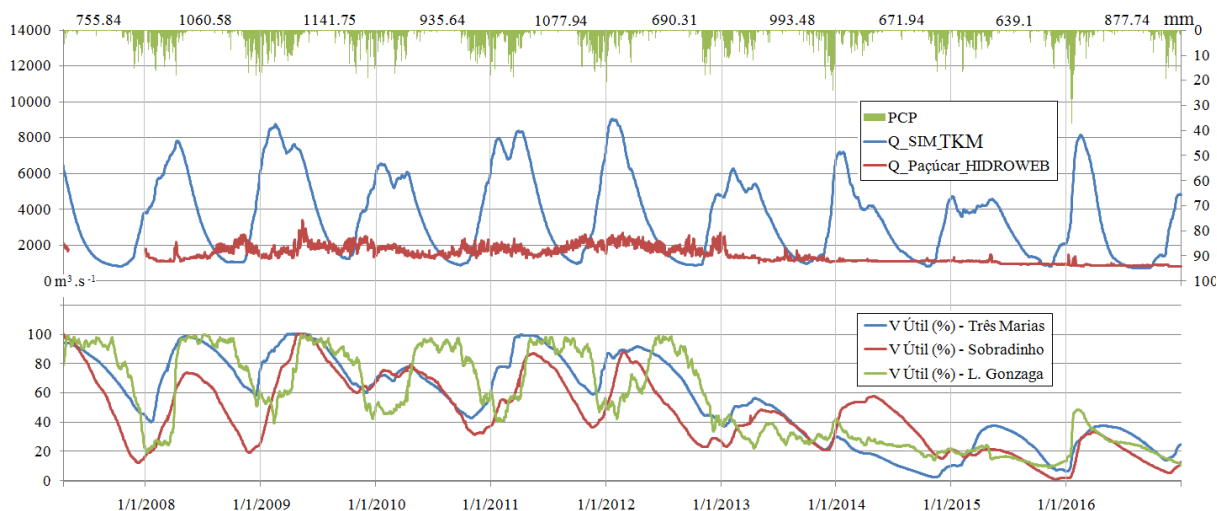
É inegável que a manutenção de um grande reservatório mais próximo às principais turbinas de geração é um fator estratégico. Contudo, observando-se mais atentamente para a figura 6.17, percebe-se que apenas na seca que teve início a partir de 2012 foi afetada de forma grave a manutenção dos níveis mais elevados do reservatório Luiz Gonzaga. Observa-se ainda que as vazões na estação de Pão de Açúcar/AL apresentam grande redução e manutenção a nível praticamente constante após o ano de 2013.

Na figura 6.18, o fato marcante da interferência das barragens na redução dos fluxos de vazão do rio São Francisco, pode ser observado. Da série de médias anuais (ordenadas) das vazões registradas na estação fluviométrica da ANA em Pão de Açúcar/AL no período de 1931 a 2016, constata-se as reduções das vazões de modo objetivo, bastando-se atentar para o fato de que nos primeiros 44 anos (50%) da série total, destacados a partir do centro da figura em direção às secas, contabilizam-se somente 8 anos representantes daqueles períodos anteriores à regularização do rio São Francisco, sendo que de fato indicam momentos das grandes secas registradas no pré-barragens, ou seja, aproximadamente 82% do período é compreendido por dados predominante acima de meados da década de 1974 para cá, intensificando-se a coincidência da apresentação das datas no modo sequencial e decrescente conforme vão se aproximando as datas mais recentes, com 2016, na extrema esquerda, ranqueando a lista da pior seca do rio sob a perspectiva das vazões empíricas do rio São Francisco registradas na região do Baixo.

Como visto, tal fato não se compatibiliza com o registro das chuvas observadas (Tabela 6.3), pois a pior época de chuva apresenta um valor acumulado anual Thiessen, para a bacia hidrográfica do rio São Francisco, de 581.21 mm, em 1963, o que na forma de uma média anual de $2663 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ de vazão em Pão de Açúcar/AL. Enquanto os segundo e terceiro piores acumulados de chuvas anuais Thiessen foram as dos anos de 2015 (639.1 mm) e 2014 (671.94mm), para os quais foram registrados os respectivos valores médios anuais de vazões $1010 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e $1109 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, ou seja, estas vazões refletem uma queda de 71% em relação àquelas registradas em 1963. E isto só vem piorando, pois observando que em 2016, enquanto o acumulado anual da chuva Thiessen subiu ainda mais, encontrando 877.74mm precipitados, por

sua vez as vazões só pioraram, com registro de $867 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, ou em outras palavras, constata-se que para 2016, com uma chuva 151% superior a de 1963, registrou-se queda de 78% para as vazões. Como todas as análises foram realizadas a partir dos dados oficiais da ANA (2017), ou de produtos determinísticos obtidos a partir destes, conclui-se que a crise hídrica não é explicada satisfatoriamente pela redução das chuvas.

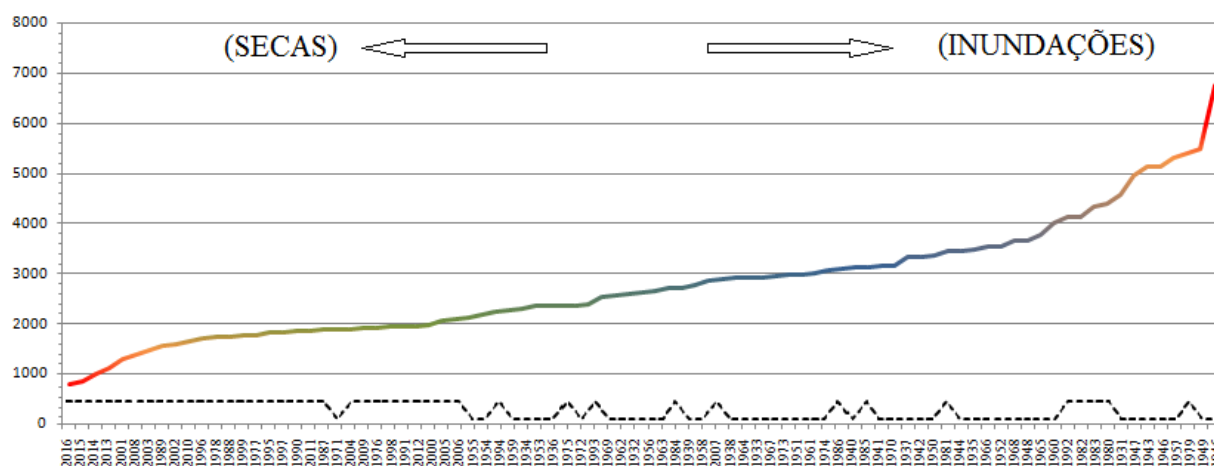
Figura 6.17. Falha na manutenção do enchimento do reservatório Luiz Gonzaga no período de 2013 a 2016.



As tomadas de decisão na operação de controle dos volumes dos reservatórios levam em conta resoluções excedentes à extensão da bacia em estudo e à forte crise hídrica que vivencia. Se não fosse o caso, haveria condição de ainda se ter água suficiente para que sequer fosse percebido que se enfrenta tão grave seca, por conta da enorme capacidade de regulação dos reservatórios do São Francisco. Por outro lado, a manutenção das vazões à jusante da Hidrelétrica de Xingó, a níveis tão baixos e constantes como os identificados a partir de 2013, não se coadunam com as vazões simuladas para este mesmo período, pelo modelo calibrado e validado TKM.

Tanto no que concerne às grandes diferenças das amplitudes sazonais, quanto nos valores médios de vazão anual onde o TKM apresenta um valor médio de $2221.9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, contra a média de $1068.7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ registrada pela estação fluviométrica da ANA em Pão de Açúcar/AL entre 01 de janeiro de 2013 a 31 de dezembro de 2016, o que representa uma diferença de 48% a menor. Na Figura 6.19 podem ser visualizadas as diferenças entre as tendências ordinárias das médias anuais de vazão das séries de dados da ANA, nº 49370000 e das séries sintéticas TKM e da ONS (ONS, 2016), respectivamente.

Figura 6.18. Gráfico das vazões médias anuais do rio São Francisco em ordem crescente.



Observação: A linha tracejada representa a plotagem binária (se ano ≥ 1974 plotar valor um, se não plotar valor zero), demonstra a não aleatoriedade da série no segmento à esquerda do ano de 1956.

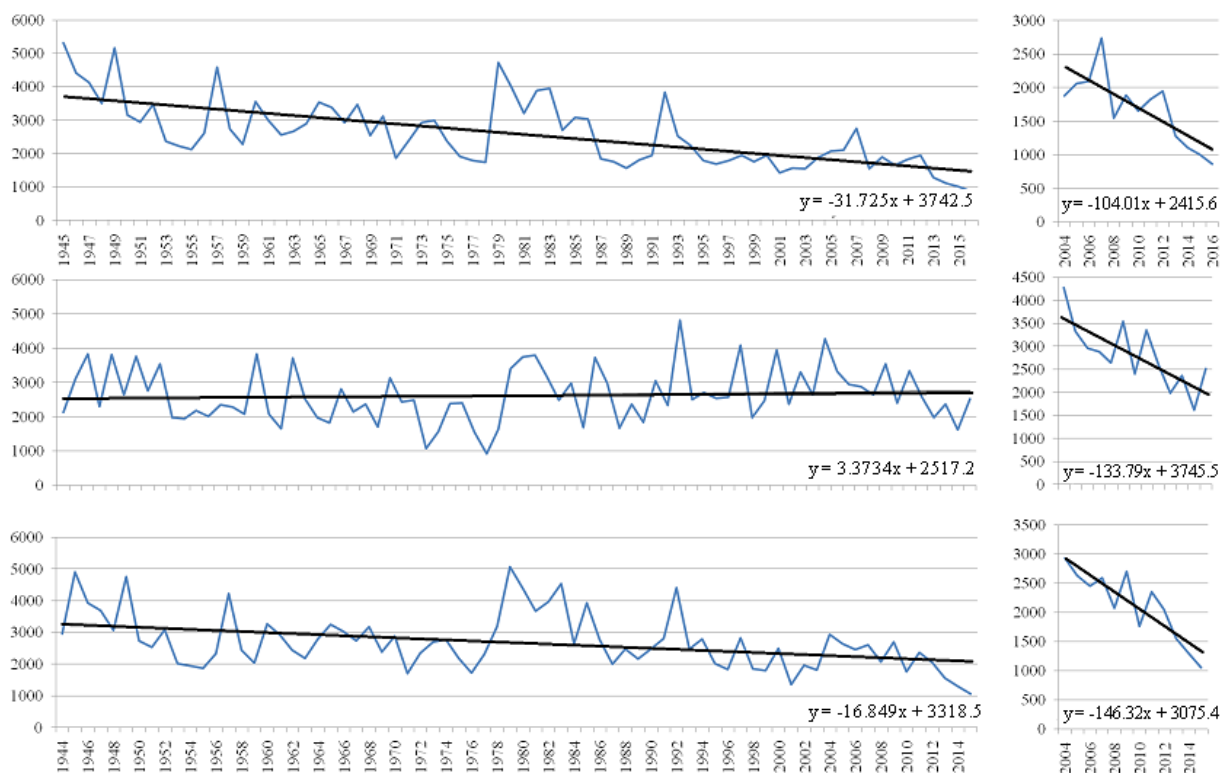
É mister lembrar que a ANA (ANA/GEF/PNUMA/OEA, 2004) apresentou a estimativa de que até o limite de 800.000 ha irrigados não se instalariam conflitos significativos de usos entre os setores agropecuário e hidrelétrico e que daí por diante seria necessário negociar e se estabelecer regras e critérios de prioridades. Em 2003, a área irrigada era de 342.712 ha, havendo assim grande potencial para irrigação sem que ocorram conflitos com a geração de energia.

Associa-se isto o fato de que no ano de 2012 a área ocupada pela irrigação ampliara-se cerca de 84%, passando a 626.941 ha e que metade desta grande expansão está localizada no extremo oeste baiano e no Vale São Franciscano da Bahia (225.574 ha e 88.232 ha, respectivamente), representada principalmente pela expansão das *commodities*: milho e soja (CBHSF, 2015). Deve-se atentar ainda que de 2012 a 2018 já se passaram seis anos, e que a expansão da área cultivada em 84% se dera no decorrer de apenas nove anos (2003-2012), de modo que a área atual ocupada pela irrigação pode já ter ultrapassado um "teto" de conforto hídrico.

O que é grave é que não se leva em conta a participação das reservas representadas pela umidade do solo e dos aquíferos subterrâneos na produção de água do rio São Francisco. Conforme os estudos apresentados pelo CBHSF (2016) a situação das reservas subterrâneas são confortáveis em praticamente 100% da bacia hidrográfica, principalmente nas regiões onde incidem as expansões da ocupação agrícola, quando se sabe que não se pode garantir tal estimativa cientificamente. Para tais regiões, é ainda projetado um cenário de consumo

exagerado e do mesmo modo, se afirma que a capacidade de suporte subterrâneo será de confortável a excelente pelos próximos dez anos da validade do Plano de Decenal atual.

Figura 6.19. Gráficos das regressões ordinárias de vazões médias anuais do rio São Francisco registrados pela ANA (Estação nº 49370000) e sintéticas TKM e SAR.



Observação: No sentido de cima para baixo tem-se vazões empíricas da ANA (1945 a 2016) e (2004 a 2016), vazões TKM (1945 a 2016) e (2004 a 2016) e reconstituição das vazões naturais da ONS (1944 a 2015) e (2004 a 2015)

A estrutura e características hidrológicas dos solos vêm sendo modificadas, uma vez que vêm sofrendo com a progressiva supressão da vegetação natural, que apresenta sistema radicular mais profundo que as culturas predominantes das *commodities*. Aliado a isto a necessidade de seus sistemas de irrigação por pivô-central, complementa a captura de parcelas importantes das reservas dos aquíferos que antes participavam na manutenção de vazões seguras na calha principal do rio.

É inclusive um fato marcante, que durante aqueles 9 (nove) anos decorridos com acelerado crescimento das áreas irrigadas, apresentados pelo CBHSF (2015), foram registradas maiores ocorrências de chuvas do que as que vêm acontecendo desde o ano de 2013. Isto gera um duplo golpe ao sistema de gestão das águas do São Francisco, pois sem a consideração de sazonalidades e períodos de secas mais persistentes, fora ampliada a exploração, o que fez com

que antecipou a descarga do aquífero e iniciado uma crise hídrica muito precocemente, que por sua vez será mais grave e duradoura, rebatendo-se na queda da produção rural e hidroenergética.

Na figura 6.12, gráfico RAPS, vê-se uma inversão do ciclo das chuvas a partir do ano de 2012, daí que a ampliação das áreas agrícolas até aquele momento fora totalmente desordenada, uma vez que pode se estar adentrando numa fase de redução das ofertas e da regularidade das chuvas. Compreendendo-se a interação entre esta sazonalidade das precipitações e a dinâmica da participação dos solos e subterrânea na formação das vazões e a interferência que as crescentes retiradas de água acarretam sobre o delicado equilíbrio daquela, é de se crer que irá se tornar cada vez mais crítica as respostas de vazão aos aportes pluviais.

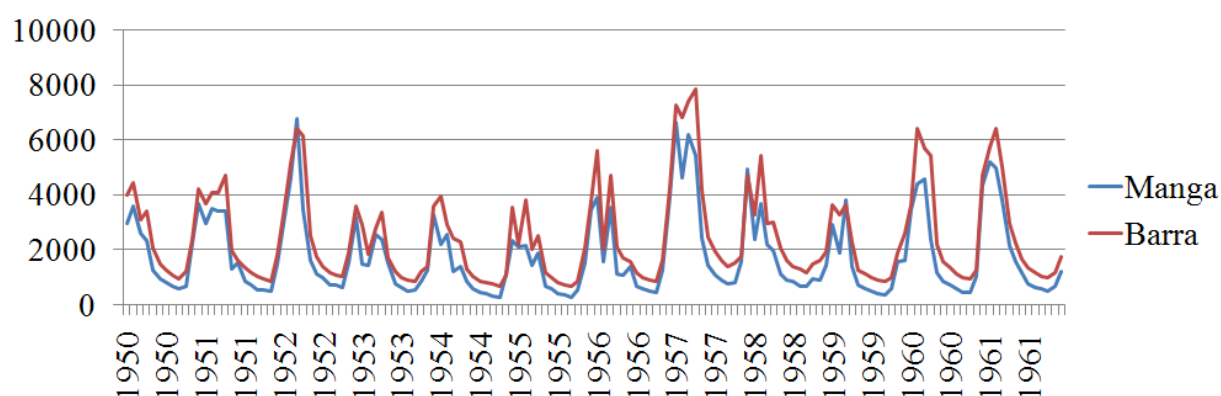
O CBHSF, (2015), afirma que no Sistema de Informação de Águas Subterrâneas (SIAGAS) estão atualmente inventariados 37.500 poços na bacia hidrográfica do São Francisco, dos quais 83% distribuídos nas regiões do Médio e do Submédio. Nestes estudos (Idem) também se concluiu que aproximadamente 41% das disponibilidades hídricas subterrâneas da bacia ocorrem no sistema aquífero Urucuia. Nascimento (2009) reporta ter encontrado para a sub-bacia do rio Grande, afluente do rio São Francisco, que de uma vazão média de $300.30 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ daquele rio, a descarga de base devida ao aquífero Urucuia era correspondente a um valor de $211.21 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. O conhecimento da dinâmica do rio São Francisco deve levar em conta o funcionamento das componentes subterrâneas que dela participam. Entre os anos de 1816 e 1822, Auguste de Saint-Hilaire fez uma viagem pelo interior do Brasil e, numa primeira leitura, afirmou que:

"na estação das chuvas, que começa pelos fins de setembro dura até janeiro, o rio engrossa pouco a pouco; acaba por transbordar e, nos lugares em que a Serra não fica a muito pequena distância, as águas se estendem por uma légua e mais até. (...) A terra permanece inundada durante um mês e, às vezes mais. Pouco a pouco as águas se retiram; escoam-se para o rio, e, no mês de abril, já aterra só exhibe uma lama lodacenta." (SAINT-HILAIRE, 1975, p.338),

O que se observa na Figura 6.20 coincide com as afirmações de Saint-Hilaire (1975) e alerta para a existência de fragilidade do referido aquífero, apesar dos seus grandes volumes. Como foi apresentado no Capítulos 2 e 3, o aquífero Urucuia está superposto ao aquífero cárstico do grupo Bambuí, contribuindo para a sua recarga. Suas águas também afluem para nascentes do rio Tocantins. Além da sua elevada condutividade hidráulica que aliada às atuais demandas para irrigação das *commodities* agrícolas, expõe a necessidade de aprofundamento dos estudos hidrogeológicos nesta área e servem de alerta para que seja dada uma pausa na tempestiva ampliação da atividade agropecuária naquela região.

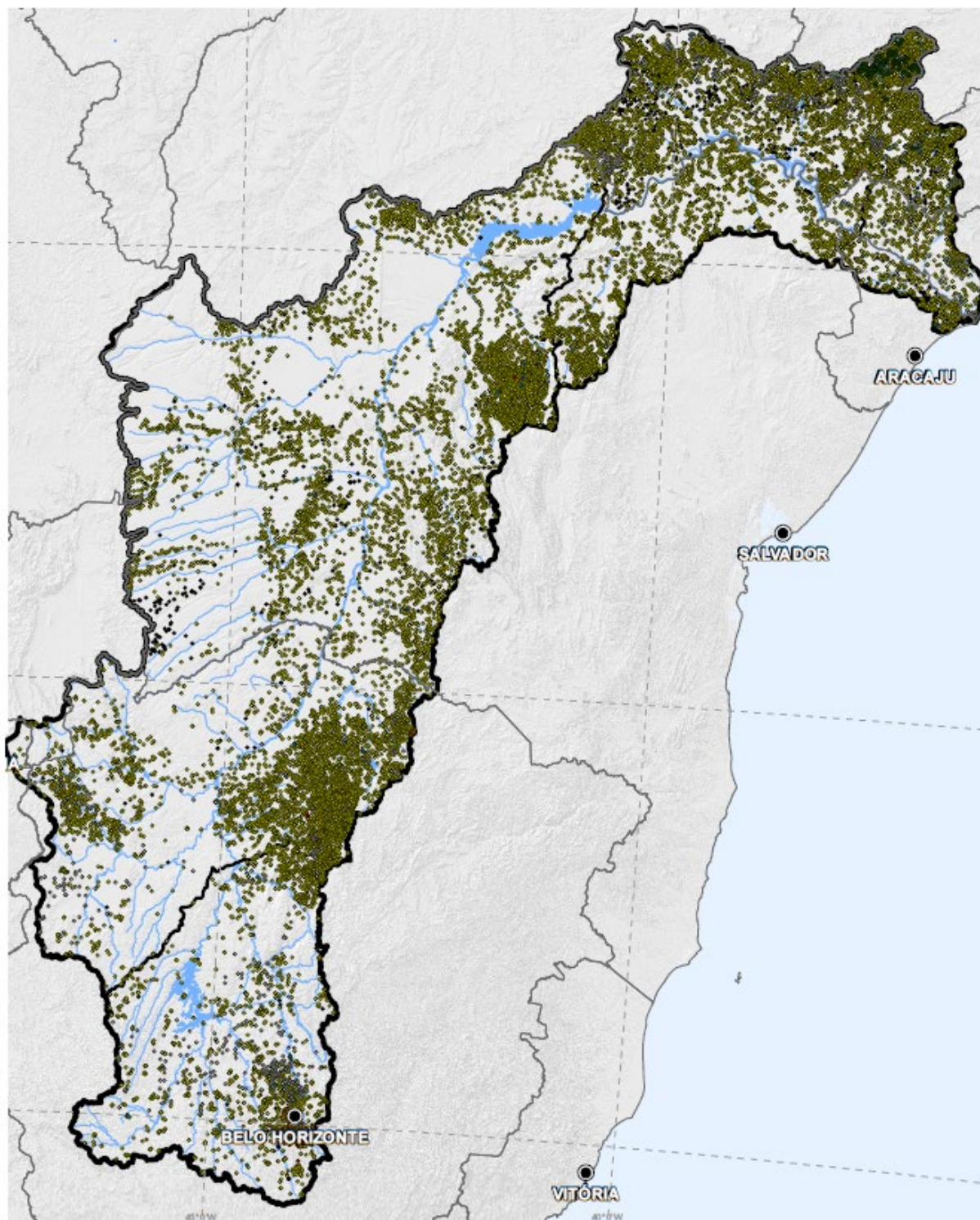
A participação da dinâmica subterrânea vai se tornando mais relevante a partir dos municípios de São Romão, São Francisco e Manga (todos em Minas Gerais). Neste caso, tomando-se as vazões médias registradas, para estas estações, no período anterior ao das grandes barragens e avaliando-as em relação à estação de Barra, já no Estado da Bahia, constata-se algo neste sentido. É muita divulgada a importância das vazões dos rios afluentes da margem esquerda do São Francisco neste trecho, cujas vazões de base são devidas às contribuições do aquífero Urucuia.

Figura 6.20 - Comparações das vazões registradas pelas estações fluviométricas localizadas em Manga/MG e Barra/BA na bacia do São Francisco.



O que pode ser visto na figura 6.20 é que nos anos de 1951, 1957 e 1959, as vazões de montante (Manga/MG) ultrapassaram as vazões de jusante do Urucuia (Barra/BA). observa-se ainda que na fase de ascensão das vazões quando se iniciam as chuvas, ambas as estações apresentam vazões praticamente iguais, ao contrário do que se poderia esperar, pois à jusante da estação de Manga/MG é justamente onde irão ocorrer contribuições dos afluentes da margem esquerda (do domínio Urucuia). Não há nenhum incremento relevante nas vazões do rio São Francisco neste trecho no período. Isto indica que há, num primeiro momento, a predominância da infiltração das águas e recarga do aquífero. Já no período de recessão das vazões do São Francisco é que se vai perceber a importância do Urucuia na manutenção de maiores vazões sendo registradas na estação fluviométrica da ANA em Barra/BA. É também neste percurso que ocorrem as interseções entre a calha do rio São Francisco e aquelas interfaces geológicas cársticas e cavernícolas. Através da visualização da distribuição dos poços cadastrados no banco de dados do SIAGAS se tem uma percepção da complexidade das interrelações do sistema bacia hidrográfica do rio São Francisco. (Figura 6.21).

Figura 6.21 - Poços de captação subterrânea cadastrados no SIAGAS.



Fonte: CBHSF (2015).

Por outro lado, não se deve esquecer que, apesar de até este ponto terem sido tratadas apenas as questões atinentes à água, há ainda outros prejuízos relacionados à diminuição dos seus volumes e ao seu controle através da cascata de barragens, que não somente as suas perdas

quantitativas. Assim, devemos lembrar da região da Foz do rio São Francisco, porque enquanto rio, o São Francisco tem que ser visto como um todo. Na região da sua Foz, diante do avanço do mar com a diminuição das vazões, enfrenta-se a salinização de suas águas superficiais provocada pelo avanço da cunha salina para montante do rio provocando impactos negativos para o abastecimento público, agricultura, lazer, pesca, ecossistemas (lagoas marginais, além da progressiva morte do manguezal e da perda de biodiversidade. E os motivos que favorecem isto são a diminuição da vazão afluyente e as quantidades de sedimentos dissolvidos, devido às barragens ao longo do curso do rio, que além de reterem sedimentos, diminuírem a força e o volume das vazões e assim, sua capacidade de transporte de nutrientes vitais para os habitats continentais e oceânicos. Assim, a modelagem hidrológica torna-se ferramenta imprescindível ao planejamento e gestão das águas da bacia hidrográfica do rio São Francisco (Santana, 2018). E estes problemas são ainda maiores, pois não estão sendo somadas as perdas sofridas pelos processos erosivos na zona costeira do Estado de Sergipe e a redução da produtividade marítima, originadas pela falta de aportes de sedimentos que revitalizam a base de sua cadeia trófica.

Apesar de tudo o que foi discutido, não se quer apontar um culpado em específico para os "inexplicáveis" $523 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ que prevalecem monotonamente ocorrendo no Baixo São Francisco, quando poderia muito bem estar girando, em média, na faixa dos $2200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, considerando-se como início da crise como sendo o ano de 2012 até o ano de 2016, quando se encerram os dados disponíveis para a realização do presente estudo. Pelo contrário, quer se demonstrar de fato que todo um conjunto de fatores tem se somado na construção desta nova realidade do rio, cujos horizontes não querem revelar nenhum indício de melhora, pois mesmo que houvesse a perspectiva de se iniciar um novo ciclo de aumento das chuvas, projetam-se expansões da produção do agronegócio e transposições das suas águas.

Assim, resgata-se a discussão da temática de crise, quando se constata que entra em vigência uma crise hídrica na bacia hidrográfica do rio São Francisco, em franco processo de agravamento do quadro de escassez de água, exigindo que ações de escolha, interpretação, julgamento e decisão sejam realizadas por todos os que dependam diretamente de suas águas. Deve-se, prioritariamente, envidar esforços no esclarecimento e detalhamento dos fatores desencadeantes e suas interações de modo que a ação a ser realizada permita o controle da situação, visando garantir um desenvolvimento economicamente seguro, socialmente justo e ambientalmente sustentável.

6.5. CONCLUSÕES

6.5.1. Conclusões sobre a diminuição das chuvas e gestão dos recursos hídricos

Relevantes mudanças no comportamento das chuvas têm ocorrido, afetando suas intensidades e durações nos anos de 2012, 2013, 2014, 2015 e 2016. Este período pode ser caracterizado como uma das piores secas já registradas na história do rio São Francisco, mas que não justifica a manutenção de vazões a níveis tão baixos e constantes como aqueles observados na estação fluviométrica da ANA, nº 49370000, localizada em Pão de Açúcar/AL.

Apesar da presença de um poderoso sistema de armazenamento/regularização das vazões no rio São Francisco, a sua operação pode não ser das mais eficazes, nos períodos de escassez d'água. Isso se deve à integração nacional do setor elétrico brasileiro e à complexidade dos elementos envolvidos nas tomadas de decisão e por não serem considerados, de fato, os demais usos das águas pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).

A falha do planejamento e gestão dos recursos hídricos na bacia hidrográfica do rio São Francisco se dá pela não inserção da parcela de contribuição das águas armazenadas nos solos e subterrâneas na conversão das chuvas em vazões. Já que são desconsideradas as interações entre solo, subsolo, vegetação, relevo e clima nas decisões da operação das grandes barragens.

A falha do sistema de outorgas para o uso das águas, na bacia hidrográfica do rio São Francisco, se dá pela pouca importância que é dada à parcela de contribuição das águas armazenadas nos solos e subterrâneas na conversão das chuvas em vazões. Já que é subestimada a importância das interações entre solo, subsolo, vegetação, relevo e clima para o seu dimensionamento e adequação sazonal.

6.5.2. Conclusões relativas à modelagem chuva-vazão com Tank Model

O modelo hidrológico concentrado Tank, apresenta ótimos resultados na simulação de vazões da bacia hidrográfica do rio São Francisco. De modo que se pode contar com vazões simuladas, realísticas, que fazem excelente contraponto às vazões "naturais" registradas, em Pão de Açúcar/AL, nas duas últimas décadas.

A abertura de um orifício de drenagem no último tanque do modelo TKM, aumentou a qualidade das calibrações, promovendo, além de ótimos coeficientes Nash-Stutcliffe para a calibração e validação, de 0.72 e 0.68 respectivamente, uma melhora significativa no ajuste gráfico, permitindo a eliminação de tendências nas séries sintéticas simuladas.

6.5.3. Algumas recomendações aos futuros pesquisadores na área de modelagem hidrológica voltada ao planejamento e gestão de recursos hídricos.

Recomenda-se aos futuros pesquisadores que aperfeiçoem a metodologia de cálculo das médias diárias de chuvas pela técnica de Thiessen, especificamente no que se concerne à rotina de preenchimento das falhas encontradas nas séries das estações onde, ao invés de ser computada uma média geral entre as estações da população considerada para o dia em questão, que se a calcule ou através da média entre vizinhos mais próximos (no caso uma composição de 3 ou 4 estações do entorno da estação com falha), ou através do cálculo a partir do inverso da distância das estações considerados no cômputo da média. O destaque para esta recomendação está no fato de que os resultados obtidos com a adoção desta estratégia tornam mais práticas as avaliações, pois permite uma integração dos dados sem que haja perda de qualidade, de tal maneira, que parece captar precisamente a informação das chuvas, tornando possível o uso do modelo Tank Model para uma grande bacia hidrográfica.

Recomenda-se que se elabore um zoneamento da bacia a partir das suas características de uso/cobertura, hidrogeológicas, climáticas e de relevo de modo a se configurar um modelo Tank Model semi-distribuído que consiga captar a produção de água, tanto no nível regional quanto de toda a bacia hidrográfica do rio São Francisco. Para isso, a rotina do cálculo de Thiessen precisa ser aperfeiçoada para que se processe de modo automático, pois para cada uma das zonas definidas serão necessárias chuvas diárias realísticas.

Outra recomendação é para que se ampliem as pesquisas sobre a capacidade de representação dos compartimentos hídricos do solo e sub-solo do modelo Tank Model, com ênfase no desenvolvimento de um modelo específico para a região do aquífero Urucuia, de modo a se tornar possível o acompanhamento das reservas subterrâneas a fim de se obter um melhor ordenamento das captações, inclusive com a elaboração de planos de contingência de crises e emergências que possam ser aplicados com margem de antecedência a partir das sinalizações do modelo. Esta proposta, era de início pensada como só sendo possível de ser realizada a partir de um modelo distribuído e de base física, tal qual o SWAT, contudo, enfatiza-se que o modelo Tank Model é efetivo quanto à capacidade de comunicar o comportamento hidrodinâmico dos aludidos compartimentos.

Finalmente, que sejam envidados todos os esforços para que seja montado um banco de dados dos atributos físicos dos solos requeridos pelo modelo SWAT e dos atributos das principais coberturas vegetacionais de interesse na caracterização do uso/cobertura das terras das

bacias hidrográficas brasileiras. Estas duas classes de atributos são as mais fundamentais para que se possa obter êxito nas calibrações do SWAT, para além do mero ganho no ajuste das vazões no exutório do rio, já que são necessários detalhamentos do comportamento da água armazenada no solo e do comportamento evapotranspirativo de cada região da bacia, para que se possa aplicar as melhores práticas conservacionistas dos solos e das águas, adequadas a cada lugar. Ordenando-se, assim, o planejamento ao nível local e na medida do necessário, a fim de se evitar desperdícios de recursos públicos com ações pouco efetivas.

6.6. Referências

ANA, **Subprojeto 1.1. B** - Determinação da carga de nutrientes do rio São Francisco na região de sua foz. ANA/GEF/PNUMA/OEA, Maceió-AL, 2004.

ANA/GEF/PNUMA/OEA, Agência Nacional de Águas; GEF - Fundo Mundial para o Meio Ambiente; PNUMA - Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente; OEA - Organização dos Estados Americanos. Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco 2004-2013, 2004.

ANA - Agência Nacional de Águas. **Panorama da qualidade das águas superficiais do Brasil**: 2013. Brasília-DF, 2014.

ANA - Agência Nacional de Águas. **Página de acesso a dados das estações pluviométricas da bacia hidrográfica do rio São Francisco**. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br/>>. Acesso em mar. 2017.

ANA - Agência Nacional de Águas. **Sala de Situação da bacia hidrográfica do rio São Francisco**. Disponível em: <http://www3.ana.gov.br/portal/ANA/sala-de-situacao/sao-francisco/boletins/diario/sf_bol_diario_27_02_2018.pdf>, Acesso em out. 2017.

ANA. **Análise de estacionaridade das séries de vazões naturais afluentes em usinas hidroelétricas localizadas na bacia do rio São Francisco e nas bacias adjacentes dos rios Tocantins, Paranaíba e Grande**. 2013.

BERVEGLIERI, A., MENEGUETTE, M., PITERI, M.A. Aplicação do interpolador krigagem em modelos digitais de terrenos, comparando-se os casos de isotropia e anisotropia. **XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, pp. 7222-7229, 2011.

CAMPOS, J.E.G.; DARDENNE, M.A. Estratigrafia e Sedimentação da Bacia Sanfranciscana: Uma revisão. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 27, n. 3, pp. 269-282, 1997.

CBHSF, Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. **RP4-- Plano de Recursos Hídricos da bacia hidrográfica do rio São Francisco: Mapa 08 - Balanço Subterrâneo, Cenário 2025B - Cod: T14032_RP4_08_1602_A3**. Alagoas, 2016, p.1.

CBHSF, Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. **RP2-- Diagnóstico Consolidado da bacia hidrográfica do rio São Francisco: Volume 1 - Relatório de Diagnósticos**. Alagoas, 2015. p.489.

CHAVES, V. S. Avaliação de Algoritmos de Otimização e Funções Objetivo para Calibração Automática do Modelo Chuva-Vazão Tank Model. **Ciência e Natura**, v. 36, n. 3, pp. 527-537, 2014.

CRAN, R. Disponível em: <<https://cran.r-project.org/>>. Acesso em jul. 2016.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Súmula da 10ª. Reunião Técnica de Levantamento de Solos**. Rio de Janeiro, 1979. 83p. (Miscelânea, 1).

EMBRAPA - CNPS. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro: Embrapa-Solos, 306 p. 2006.

EMBRAPA. **Sisolos**. Disponível em: <<http://www.sisolos.cnptia.embrapa.br>> Acesso em: 26/10/2015.

FERNANDES, J. G. **Estimativa de Vazão e Produção de Sedimentos na bacia hidrográfica do rio São Francisco, utilizando o modelo SWAT**. 2015. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal do Pernambuco, Recife-PE, 2015.

GITHUB. **HIDROWEBDOWN**. Plataforma de hospedagem de código fonte open-source. 2018. Disponível em: <<https://github.com/lhmet/hidrowebdown>>

ISRIC - International Soil Reference and Information Center. Disponível em: <<ftp://ftp.soilgrids.org/data/aggregated/1km/>>. Acesso em: mar.2018.

JARVIS A., H.I. REUTER, A. NELSON, E. GUEVARA, 2008, Hole-filled seamless SRTM data V4, **International Centre for Tropical Agriculture (CIAT)**. Disponível em: <<http://srtm.csi.cgiar.org>>. Acesso em: fev 2018.

KOBIYAMA, M. Notas de aula. Disciplina de Hidrologia Florestal. Pós-graduação em Engenharia Ambiental – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2003.

LARA, P.G., KOBIYAMA, M. Proposta de modelo conceitual: PM Tank Model. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.3, pp.149-161, 2012.

LIMA, J.E.F.W., SANTOS, P.M.C., CHAVES, A.G.M., SCILEWSKI, L.R. **Diagnóstico do fluxo de sedimentos em suspensão na Bacia do Rio São Francisco**. Brasília: Embrapa Cerrados, 1ed., 2001. p.108.

- LINDNER, E.A. **Estudo de eventos hidrológicos extremos na Bacia do Rio do Peixe-SC com aplicação de índice de umidade desenvolvido a partir do Tank Model**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, 2007.
- LINDNER, E.A., KOBAYAMA, M. Proposal of Tank Moisture Index to predict floods and droughts in Peixe River watershed, Brazil. **IAHS Publication**, v.331, p.314-323, 2009.
- MENDES, T.A., VIEIRA, M.E.A., FRANCO, C., FORMIGA, T.M., BARBALHO, F.D. Aplicação do Tank Model na modelagem na bacia hidrográfica de flores de Goiás. **Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, São Paulo-SP, 2007.
- MMA - Ministério do Meio Ambiente. **Diagnóstico do macrozoneamento ecológico-econômico da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco/SEDR/DZT/MMA**. – Brasília: MMA, 2011.
- MMA. MacroZEE-BHSF. Atualização e Complementação do Diagnóstico do Macrozoneamento Ecológico-Econômico da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. **Relatório da Atualização e Complementação do Diagnóstico do Meio Físico-Biótico da BHSF**. Revisão Final - Tomo I. Brasil, 2016.
- MMA - Ministério do Meio Ambiente. Página de acesso a dados. Disponível em: <<http://mapas.mma.gov.br/i3geo/datadownload.htm>>. Acesso em: 05/10/2017.
- MORAES, J.M. Propriedades físicas dos solos na parametrização de um modelo hidrológico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 1, pp. 12-20, 2003.
- MORIARTY, D.N. *et al.* Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 3, pp. 885-900, 2007.
- MUEHE, D. **Erosão e progradação do litoral brasileiro**. 2ª ed. Brasília:MMA, 2006.
- NAGHETTINI, M.; PINTO, E. **Hidrologia Estatística** [S.I.]: CPRM, 2007.
- NASCIMENTO, K.R.F. **Caracterização Estrutural e Hidráulica do Aquífero Urucuia Utilizando Métodos Geofísicos**. 2009. Tese (Doutorado em Geofísica) - Câmara de Ensino de Pós-Graduação e Pesquisa da Universidade Federal da Bahia. Bahia, 2009.
- NEMENYI, P. **Distribution-free Multiple Comparisons**. Ph.D. thesis, Princeton University. 1963.
- NUNES, F.M.S., FARIAS, C.A.S., MARTINS, W.A., ALMEIDA, R.N., LEITE, J.C.A. Aplicação do Tank Model para estimativa mensal de vazões na bacia hidrográfica do rio piacó. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 9, n. 1. 2014. pp. 343-349.
- OLIVEIRA, A.M. **Estudo Hidrodinâmico Sedimentológico do Baixo São Francisco, Estuário e Zona Costeira Adjacente (AL/SE)**. UFAL. Maceió, 2003.

OLIVEIRA, S.M. de. **Análise do processo chuva-vazão de duas bacias hidrográficas na região litorânea do estado do Paraná, através do modelo de tanque.** 1999. Dissertação (Mestrado em Agronomia, Setor de Ciências Agrárias), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1999.

ONS, **Atualização de Séries Históricas de Vazões – Período 1931 a 2015**, RE ONS 0181/2016, 2016.

PIAGET, J. Epistemologie des relations interdisciplinaires. In Ceri (eds.) **L'interdisciplinarité. Problèmes d'enseignement et de recherche dans les Universités**, Paris: UNESCO/OCDE, 1972. pp. 131-144.

PIASENTIN, C. **A história das barragens no Brasil, Séculos XIX, XX e XXI: Cinquenta anos do Comitê Brasileiro de Barragens.** Rio de Janeiro: CBDB, 2011.

PINTO, J.E.S.S., SOUSA, I.F., FACCIOLI, G.G., SILVA, V.P.R. A geografia das chuvas no baixo São Francisco sergipano: configuração e perspectivas. In: AGUIAR NETTO, A. O., SANTANA, N.R.F.S. (Org.). **Contexto socioambiental das águas do rio São Francisco.** 1ed. São Cristóvão: Universidade Federal de Sergipe, v.1, pp. 69-90, 2015.

PODGER, G. **RRL - Rainfall Runoff Library User's Guide.** Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology. 110 p. 2004.

QUARTERONI, A. "Mathematical Models in Science and Engineering". **Notices of the AMS**, v. 56, n.1, 2009.

R, CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing.** R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Disponível em: <<https://www.R-project.org/>>. Acesso em set. 2015.

REBOUÇAS, A.C. Água doce no Mundo e no Brasil. In: REBOUÇAS, A.C., BRAGA, B., TUNDISI, J.G. (org.). **Águas doces do Brasil: capital ecológico, uso e conservação.** 2ª ed. São Paulo: Escrituras Editora, 2002.

RICARD, S., BOURDILLON, R., ROUSSEL, D., TURCOTTE, R. Global calibration of distributed hydrological models for large-scale applications. **Journal of Hydrologic Engineering**, v.18, n.6, 2013. pp. 719-721.

SAINT-HILAIRE, A. **Viagem pelas províncias do Rio de Janeiro e Minas Gerais.** São Paulo: Editora USP, 378 p. 1975.

SANTANA, N. R. F.; AGUIAR NETTO, A.O.; SOUZA, I.; GARCIA, C.A. Salinidade na foz do rio são francisco com uso de modelagem computacional. **Anais II Simpósio da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco.** Aracaju. 2018. p.10.

- SILVA, W.D.A. **Avaliação de alguns modelos chuva-deflúvio para o Estado da Paraíba**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba, 1993.
- SITTNER, W. T. WMO project on intercomparison of conceptual models used in hydrological forecasting. **Hydrologic Set Bulletin** 21(13), 203-213. 1976.
- SOUZA, S. A.; ARAUJO, A. A.; TROGER, F. H. Análise de estacionariedade das séries hidrometeorológicas localizadas na bacia do rio São Francisco. **In Anais do XX Simpósio brasileiro de recursos hídricos**, Bento Gonçalves, 2013.
- SUGAWARA, M. On the Analysis of Runoff Structure about Several Japanese Rivers. **Japanese Journal of Geophysics**, v. 2, n. 4. p.1-76, 1961.
- SUGAWARA, M. Automatic calibration of the tank model. **Hydrological Sciences Bulletin**, v. 24, n. 3, p. 375-388, 1979.
- SUGAWARA, M., WATANABE, E., OZAKI, E., KATSUYAMA, Y. Tank Model Programs for Personal Computer and the Way to Use (Second Report). Reporter nº 556.16 : 627.51: 681.3, **National Research Center for Disaster Prevention**, Japan, 200p. 1986
- SUGAWARA, M. Tank model.. In: SINGH, Vijay P. et al. (Ed.). Computer models of watershed hydrology. Highlands Ranch, CO: **Water Resources Publications**, pp.165-214, 1995.
- SUGAWARA, M. Tank model with snow component, **Research Notes of the National Research Center for Disaster Prevention** v. 65, p. 293, 1984., Tsukuba, Japão. 1984.
- SUZUKI, K. **Tank-model for runoff analysis**. Ehime University, Japão. 1997.
- VALENÇA, M. J. S.; HOLTZ, J.; KYRILLOS, D. (2015). A Água do Rio São Francisco Está Sumindo? **In Anais do XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Brasília, 2015.
- VALENÇA, M. J. S.; MELO, H. Impacto da não estacionariedade da série de vazões naturais afluentes ao reservatório de Sobradinho na sua capacidade de regularização. **In Anais do XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Florianópolis, 2017.
- VASCONCELLOS, S.M.; LAVAGNOLI, S.; KOBIYAMA, M. Análise de eventos de seca no baixo rio são francisco a partir do tank moisture index. In: **Anais I Encontro Nacional de Desastres**. Porto Alegre, 2018.
- VASCONCELLOS, S.M. Desenvolvimento de um índice de umidade do solo derivado da versão distribuída do tank model. 2017. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Básico) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017. p.104.
- VIEIRA, P.F. Gestão patrimonial de recursos naturais: construindo o ecodesenvolvimento em regiões litorâneas. In: CAVALCANTI, C. (org.). **Desenvolvimento e natureza**: estudos para uma sociedade sustentável. São Paulo: Cortez; Recife: Fundação Joaquim Nabuco, 1995.